

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Malá vodní elektrárna
Small Water Power Plant

Student:

Bc. Radim Jílek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Bc. Radim Jílek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Malá vodní elektrárna**
Small Water Power Plant

Zásady pro vypracování:

Zpracujte téma využití hydroenergetického potenciálu toků se zaměřením na problematiku malých vodních elektráren a základní návrh konceptu strojní části malé vodní elektrárny v dané lokalitě, v rozsahu platné legislativy. Návrh proveďte na základě znalosti odtokové křivky a místních podmínek. Návrh, optimalizace bude založena na požadavku maximálního využití hydroenergetického potenciálu dané lokality a optima nákladů investičních.

Práce bude obsahovat:

- teoretickou část týkající se využití hydroenergetického potenciálu toků se zaměřením na problematiku malých vodních elektráren
- analýzu využití hydroenergetického potenciálu daného toku v dané lokalitě
- volba vhodného typu vodní turbíny,
- návrh optimální varianty řešení strojní části vodní elektrárny a její analýza s ohledem na využití hydropotenciálu lokality
- rozpracování vybraného řešení, základní ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Gabriel, P., Čihák, F., Kalandra, P.: Malé vodní elektrárny. Praha 1998, ISBN 80-01-01812-1
2. Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A.: Renewable Energy Technology, Economics and Environment, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-70947-3
3. Melichar, J., Vojtek, J., Blahak, J.: Malé vodní turbíny, konstrukce a provoz. Praha 1998, ISBN 80-01-01808-0
4. Firemní literatura - vodní turbíny


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 20. května 2011

Radim Kláš

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. května 2011


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Radim Jílek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Bohumínská 1667, 735 32 Rychvald

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyszku Szeligovi, Ph.D. za rady a připomínky, které mi poskytoval při práci na bakalářském úkolu.

Anotace bakalářské práce

JÍLEK, R. *Malá vodní elektrárna: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 65 s. Vedoucí práce: Szeliga, Z.

Bakalářská práce obsahuje rozbor vodohospodářského a hydroenergetického řešení, strojní a elektrické části malé vodní elektrárny. Byl proveden návrh strojní části malé vodní elektrárny pro zadanou odtokovou křivku. Na základě odtokové křivky byl zvolen vhodný typ turbíny. V práci je obsažen návrh řešení pro variantu s jednou a se dvěma turbínami. Pro každou variantu je vypočítán instalovaný výkon, množství vyrobené elektrické energie a navržen generátor a transformátor. Pro jednotlivé varianty malé vodní elektrárny jsou vypočítány investiční náklady a doba návratnosti investic.

Klíčová slova

Malá vodní elektrárna, odtoková křivka, Kaplanova turbína

Annotation of Bachelor Thesis

JÍLEK, R. *Small Water Power Plant: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2011, 65 p. Thesis head: Szeliza, Z.

This bachelor thesis contains analysis of the water and hydropower solutions, mechanical and electrical parts of small water power plant. Mechanical part concept of small water power plant was made for a given run-off curve. Appropriate type of water turbine was selected based on run-off curve. Design solution for variant with one and two turbines is contained in my thesis. Installed capacity, amount of produced electrical energy is calculated for each variant and generator and transformer are suggested. Investment costs and payback period are calculated for each variant of small water power plant.

Key words

Small water power plant, run-off curve, Kaplan turbine

Seznam některých použitých symbolů a zkratek:

Značka	Název veličiny	Jednotka	
		hlavní	vedlejší
A	vyrobená energie	(Wh)	(kWh), (MWh)
A_S	skutečná využitelná energie	(Wh)	(kWh), (MWh)
$A_{T,V}$	energie teoreticky využitelná	(Wh)	(kWh), (MWh)
D_I	průměr vstupního profilu turbíny	(m)	
D_S	průměr výstupního profilu turbíny	(m)	
E	měrná energie	(J·kg ⁻¹)	(kJ·kg ⁻¹)
E_I	energie vodního toku	(N·m)	
$E_{50\%}$	teoretické množství energie unášené řekou za rok	(J·rok ⁻¹)	(kJ·rok ⁻¹)
\overline{F}_{m0}	výsledná magnetomotorická síla	(A)	
\overline{F}_{m1}	magnetomotorická síla statoru	(A)	
\overline{F}_{m2}	magnetomotorická síla rotoru	(A)	
H	spád	(m)	
H_{I-2}	spád mezi dvěma profily 1 a 2	(m)	
H_b	hrubý spád	(m)	
$H_{stř}$	střední spád	(m)	
I_N	jmenovitý proud	(A)	(kA)
N	celkové investiční náklady	(Kč)	(tis. Kč), (mil. Kč)
N_I	počet závitů v sérii jedné fáze ve statoru	(-)	
$N_{inv.}$	měrné investiční náklady	(Kč·kW _e ⁻¹)	
P	teoretický hydroenergetický potenciál	(W)	(kW)
P	výkon	(W)	(kW)
p	počet pólových dvojic	(-)	
P_0	teoretický výkon turbíny	(W)	(kW)
P_{I-2}	potenciální výkon úseku vodního toku mezi dvěma profily 1 a 2	(W)	(kW)
$P_{50\%}$	střední energetický potenciál celého toku	(W)	(kW)
Pa	mez pevnosti použité oceli v kroucení	(N·cm ⁻²)	(kp·cm ⁻²)
P_i	instalovaný výkon	(W)	(kW)
P_{max}	maximální výkon	(W)	(kW)
P_N	činný výkon	(W)	(kW)
$P_{T,V}$	výkon teoreticky využitelný	(W)	(kW), (MW)
Q	množství vody	(m ³ ·s ⁻¹)	
Q	průtok	(m ³ ·s ⁻¹)	
Q_I	průtok v profilu 1	(m ³ ·s ⁻¹)	
Q_{I20}	stodvacetidení průtok	(m ³ ·s ⁻¹)	
Q_2	průtok v profilu 2	(m ³ ·s ⁻¹)	

Q_{90}	devadesátidenní průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_A	dlouhodobý průměr průtoků	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_a	dlouhodobý průměrný roční průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_{asan}	asanační průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_{IV}	průměrný měsíční průtok za měsíc duben	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_{max}	maximální průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_{min}	minimální průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_{opt}	optimální průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
$Q_{stř}$	střední průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
Q_V	využitelný průtok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	
S_N	zdánlivý výkon	(VA)	(kVA)
T	počet hodin dodávky elektrické energie	(s)	(h)
T	doba ročního využití	(s)	(h)
U	napětí	(V)	(kV)
U_{If}	indukované napětí fázové	(V)	(kV)
U_N	jmenovité napětí	(V)	(kV)
W	mechanická práce vodního toku	$(\text{N} \cdot \text{m})$	
Z_r	roční zisk	(Kč)	(tis. Kč), (mil. Kč)
c	absolutní rychlost	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
$\cos \varphi$	účinník	(-)	
c_{ul}	obvodová složka absolutní rychlosti vstupní části oběžného kola	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
d	průměr hřídele	(m)	
d_u	průměr dutiny hřídele	(m)	
e_l	tlaková výška	(m)	
f_1	statorová frekvence	(Hz)	
f_2	kmotočet skluzový	(Hz)	
g	tíhové (gravitační) zrychlení	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	
	výška dotykového bodu výtokového paprsku z dýzy s dělicí		
h'	kružnici oběžného kola	(m)	
h_{z1}	součet hydraulických ztrát v přívodu vody	(m)	
h_{z1-n}	ztráty spádu	(m)	
k_v	koeficient ročního využití	(-)	(%)
k_{v1}	činitel statorového vinutí	(-)	
l_{1-2}	délka mezi dvěma profily 1 a 2	(m)	(km)
n	otáčky	(s^{-1})	(min^{-1})
n_l	otáčky točivého pole	(s^{-1})	(min^{-1})
n_s	specifické otáčky	(s^{-1})	(min^{-1})
n_s	otáčky točivého pole	(s^{-1})	(min^{-1})

p_{1-2}	specifický výkon řeky	(W·m ⁻¹)	(kW·km ⁻¹)
s	skluz	(-)	(%)
t	doba průtoku	(s)	
t	teplota	(°C)	
u_1	obvodová rychlost vstupní části oběžného kola	(m·s ⁻¹)	
v	rychlost	(m·s ⁻¹)	
$využití P_i$	roční využití instalovaného výkonu	(W·W _e ⁻¹)	(kW·kW _e ⁻¹)
z_1	statická výška	(m)	
α	součinitel nerovnoměrnosti rychlosti (Coriolisovo číslo)	(m·s ⁻¹)	
β	úhel zakřivení lopatek	(rad)	(deg)
β	zátěžný úhel	(rad)	(deg)
Φ	magnetický tok	(Wb)	
γ	měrná tíha vody	(N·m ⁻³)	
η	účinnost	(-)	(%)
η_c	účinnost celková	(-)	(%)
η_g	účinnost generátoru	(-)	(%)
η_h	účinnost hydraulická	(-)	(%)
η_m	účinnost mechanická	(-)	(%)
η_p	účinnost převodu	(-)	(%)
η_t	účinnost turbíny	(-)	(%)
η_{tr}	účinnost transformátoru	(-)	(%)
η_v	účinnost objemová	(-)	(%)
ρ	měrná hmotnost vody	(kg·m ⁻³)	
ω_1	úhlová rychlost točivého pole (synchronní)	(rad·s ⁻¹)	
ω_2	úhlová rychlost rotoru	(rad·s ⁻¹)	
ω_s	skluzová úhlová rychlost	(rad·s ⁻¹)	

ERDF	Evropský fond pro regionální rozvoj (European Regional Development Fund)
ERÚ	Energetický regulační úřad
MVE	Malá vodní elektrárna
OPPI	Operační program podnikání a inovace
OZE	Obnovitelný zdroj energie

Obsah:

1. ÚVOD	13
2. VODOHOSPODÁŘSKÉ A HYDROENERGETICKÉ ŘEŠENÍ MVE	14
2.1. HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL VODNÍHO TOKU	14
2.1.1. <i>Mechanická práce vodního toku</i>	<i>14</i>
2.1.2. <i>Hrubý hydroenergetický potenciál</i>	<i>14</i>
2.1.3. <i>Teoretický hydroenergetický potenciál.....</i>	<i>14</i>
2.1.4. <i>Reálně využitelný hydroenergetický potenciál.....</i>	<i>16</i>
2.2. ZÁKLADNÍ PARAMETRY HYDROENERGETICKÉHO DÍLA	16
2.3. DĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN PODLE SPÁDU	21
2.3.1. <i>Nízkotlaké vodní elektrárny.....</i>	<i>21</i>
2.3.2. <i>Vysokotlaké vodní elektrárny.....</i>	<i>21</i>
2.4. DĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN PODLE ZPŮSOBU PROVOZU	21
2.4.1. <i>Průtočné vodní elektrárny</i>	<i>21</i>
2.4.2. <i>Akumulační vodní elektrárny.....</i>	<i>21</i>
2.4.3. <i>Přečerpávací vodní elektrárny.....</i>	<i>22</i>
2.5. ŘEŠENÍ PRŮBĚŽNÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	22
3. STROJNÍ ČÁST MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	25
3.1. VOLBA TURBÍNY PODLE SPÁDU	25
3.2. TURBÍNY	26
3.2.1. <i>Kaplanova turbína</i>	<i>26</i>
3.2.2. <i>Francisova turbína.....</i>	<i>29</i>
3.3. KAVITACE	32
3.4. SAVKY PŘETLAKOVÝCH TURBÍN	33
3.5. PŘEVODY.....	34
3.5.1. <i>Ozubená soukolí.....</i>	<i>34</i>
3.5.2. <i>Řemenové převody.....</i>	<i>34</i>
3.5.3. <i>Lanové převody.....</i>	<i>34</i>
3.5.4. <i>Řetězové převody</i>	<i>35</i>
3.6. UZÁVĚRY	35
4. ELEKTRICKÁ ČÁST MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	35
4.1. GENERÁTORY	35
4.1.1. <i>Asynchronní generátor</i>	<i>36</i>
4.1.2. <i>Synchronní generátor.....</i>	<i>38</i>
4.1.3. <i>Stejnosměrné dynamo.....</i>	<i>39</i>
4.2. TRANSFORMÁTORY	40
4.3. VLASTNÍ SPOTŘEBA MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	40
5. NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	41
5.1. VÝPOČET TEORETICKÉHO VÝKONU, TEORETICKÉ ENERGIE VODNÍHO TOKU	43
5.2. VARIANTA MVE S JEDNOU TURBÍNOU	44
5.2.1. <i>Turbína.....</i>	<i>44</i>
5.2.2. <i>Výpočet instalovaného výkonu pro variantu s jednou turbínou</i>	<i>45</i>
5.2.3. <i>Výpočet množství vyrobené elektrické energie.....</i>	<i>46</i>
5.2.4. <i>Generátor</i>	<i>50</i>
5.2.5. <i>Transformátor.....</i>	<i>50</i>
5.3. VARIANTA MVE SE DVĚMA TURBÍNAMI.....	50
5.3.1. <i>Turbína.....</i>	<i>50</i>
5.3.2. <i>Výpočet instalovaného výkonu pro variantu se dvěma turbínami</i>	<i>52</i>

5.3.3.	<i>Výpočet množství vyrobené elektrické energie.....</i>	53
5.3.4.	<i>Generátor</i>	57
5.3.5.	<i>Transformátor.....</i>	58
6.	NÁVRATNOST INVESTIC.....	58
6.1.	INVESTIČNÍ NÁKLADY NA VÝSTAVBU MVE.....	58
6.1.1.	<i>Investiční náklady pro variantu s jednou turbínou.....</i>	59
6.1.2.	<i>Investiční náklady pro variantu se dvěma turbínami</i>	59
6.2.	DOBA NÁVRATNOSTI INVESTIC	59
6.2.1.	<i>Doba návratnosti pro variantu s jednou turbínou.....</i>	60
6.2.2.	<i>Doba návratnosti pro variantu se dvěma turbínami</i>	60
6.3.	DOTACE	60
6.3.1.	<i>Program OPPI.....</i>	60
6.3.2.	<i>Program EFEKT.....</i>	61
7.	ZÁVĚR	62
	POUŽITÁ LITERATURA	64

1. Úvod

Současný stav využívání energie z vodních toků ve světě lze charakterizovat snahou využít co nejvíce primární hydroenergetický potenciál. Současné trendy jsou ale také rekonstrukce, nová výstavba a inovace malých vodních elektráren. Moderní vodní elektrárny jsou plně automatické a mohou pracovat bez obsluhy.

Pro stanovení předpovědí rozvoje naší hydroenergetiky a rozdělení těchto zdrojů má význam zejména hydroenergetický potenciál a jeho rozložení po České republice.

V malých vodních elektrárnách lze v České republice získat při současném využití hydroenergetického potenciálu přibližně 530 MW elektrických, to se rovná přibližně 1850 GWh/rok. Pokud připočteme malé vodní elektrárny, které je možno ještě vybudovat, celkový elektrický výkon by se zvýšil přibližně na 650 MW. Z toho je patrné, že budování těchto elektráren může mít přínos pro krytí spotřeby elektrické energie.

V současnosti je u nás provozováno asi 550 malých vodních elektráren, které jsou vybudovány u jezů, výpustných potrubí z rybníků a nádrží apod. Dvě třetiny z těchto elektráren mají výkon do 100 kW. Lze předpokládat při využití všech vhodných lokalit, že instalovaný výkon těchto elektráren by se mohl podílet asi 4 procenty celkové výroby elektrické energie v České republice.

Cílem předložené bakalářské práce je rozbor využití hydroenergetického potenciálu toků se zaměřením na problematiku malých vodních elektráren, analýza využití hydroenergetického daného toku v dané lokalitě. Pro tento vodní tok provést volbu vhodného typu vodní turbíny, navrhnout optimální variantu řešení strojní části vodní elektrárny. Pro navržené varianty zpracovat základní ekonomické posouzení předpokládané varianty.

2. Vodohospodářské a hydroenergetické řešení MVE

2.1. *Hydroenergetický potenciál vodního toku*

Údaje o hydroenergetickém potenciálu vodních toků jsou důležité pro získání informace o možnostech využití jejich potenciální energie.

2.1.1. **Mechanická práce vodního toku**

Je to práce v určitém úseku vodního toku za čas t , která je úměrná jak množství vody protékajícím průřezem koryta za jednotku času, tak i sklonu řečiště.

$$W = Q \cdot \gamma \cdot H \cdot t \cdot 1000 \text{ (Nm; m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{N} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m, s)} \quad (2.1)$$

kde Q – množství vody

γ - měrná tíha vody

$Q \cdot \gamma = G$ - tíha vody

H – spád

t – doba průtoku

Tato mechanická práce se projevuje vzájemným třením částic vody ve vodním toku a třením mezi tokem a řečištěm. Tření má za důsledek poškození koryta, břehů a odnášení splavenin, energie se mění v jiné neužitečné energie.

2.1.2. **Hrubý hydroenergetický potenciál**

Tento potenciál vychází z nadmořských výšek hodnocené oblasti a také z průměrných průtoků všech toků. Stanovujeme ho k hladině moře nebo ke kótě hladiny toku na státních hranicích. Pro Českou republiku má hydroenergetický potenciál k hraniční kótě hodnotu 18 740 GW/rok.

2.1.3. **Teoretický hydroenergetický potenciál**

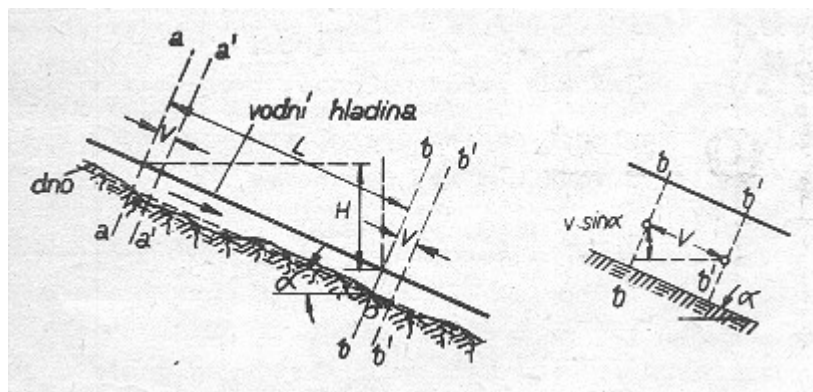
Teoretický hydroenergetický potenciál se vypočte podle vzorce

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \text{ (kW; m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{m)} \quad (2.2)$$

Tento výkon je při účinnosti přeměny 100%.

Nejrozšířenější metodu výpočtu hydroenergetického potenciálu provádíme tak, že řeku rozdělíme na jednotlivé úseky. Výpočty se provádí v souladu se zásadami, které přijal

Mezinárodní energetický výbor. Celý tok rozdělíme na úseky pomocí profilu, do kterých je možno umístit vzdouvací stupně (jezy, přehrady). Výšky těchto stupňů volíme tak, aby vznikla souvislá kaskáda s vodorovnými hladinami v jednotlivých úsecích.



Obr. 2.1 Výkon vodního toku [2]

Ze vzorce je patrné, že výkon vodního toku se určuje pro konkrétní úsek se spádem H a je přímo úměrný průtočnému množství Q , které je časově proměnné. Pokud počítáme s rovnoměrným průtokem Q , potom podle rozšířené Bernoulliho věty lze vodní energii v profilu 1-1 (obr. 2.1) vyjádřit vzorcem (2.3), který udává součet energie potenciální (polohové a tlakové) a energie kinetické (rychlostní).

$$E_1 = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \right) \cdot Q \cdot \gamma \cdot t \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (2.3)$$

kde z_1 - statická výška vzhledem k určitému bodu

p_1 - tlaková výška

Potenciální výkon úseku vodního toku mezi dvěma profily 1 a 2 se vypočítá

$$P_{1-2} = 9,81 \cdot \frac{Q_1 + Q_2}{2} \cdot H_{1-2} \text{ (kW)} \quad (2.4)$$

Ze zadaných hydrologických podkladů (křivky překročení průtoků v průměrně vodném roce) se vypočítají výkony pro tyto hodnoty průtoků (viz. literatura [4]):

Q_{50} – střední průtok s 50 % pravděpodobnosti překročení

Q_{95} – minimální průtok s 95 % pravděpodobnosti překročení

Výsledky zpracováváme tabulkově a graficky, přičemž grafické zpracování zahrnuje:

- Přehlednou situaci řeky s přítoky

- Podélný profil, který znázorňuje spádové poměry vodní hladiny
- Čaru růstu Q_{50} , Q_{95} , někdy i plochy povodí ve směru toku
- Čaru změny specifického výkonu v jednotlivých úsecích
- Součtovou čaru vodních výkonů

Specifický výkon řeky v úseku o délce l_{1-2} se vypočte

$$p_{1-2} = \frac{P_{1-2}}{l_{1-2}} \text{ (kW} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.5)$$

Pokud sečteme výkony jednotlivých úseků, dostaneme střední teoretický potenciál celého toku. Po vynásobení konstantou $3600 \cdot 24 \cdot 365$ získáme přibližnou teoretickou hodnotu množství energie, která je unášena řekou za rok.

$$\sum_1^n E_{50\%} = 3600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot \sum_1^n P_{50\%} \text{ (kJ} \cdot \text{rok}^{-1}) \quad (2.6)$$

2.1.4. Reálně využitelný hydroenergetický potenciál

Tento reálně využitelný hydroenergetický potenciál vodního toku je vždy menší než teoretický potenciál vodního toku, protože:

- Nikdy nelze využít energeticky vodní tok celý, protože v cestě stojí komunikace, města, velké objekty, chráněná území a jiné překážky.
- Stupně souvislé kaskády, které lze předpokládat, nelze všechny realizovat co do počtu, ani co do výšky
- Využití vodní energie ve formě elektrické energie znamená zavést účinnost přeměny z mechanické energie na elektrickou. Tato účinnost přeměny má přibližně hodnotu $\eta = 0,75$.

Těmito předpoklady se podstatně redukuje teoretické hodnoty a získají se pravděpodobné reálné údaje o energetickém bohatství toku. V České republice je reálně využitelný hydroenergetický potenciál asi 40 až 50 % teoretického potenciálu.

2.2. Základní parametry hydroenergetického díla

Pokud chceme, aby energie vodního toku v určitém úseku byla využita s co největší účinností, je nutno na tomto úseku soustředit spád a průtok.

- **Spád** – výškový rozdíl hladin vody v nádrži nebo zdrži nad vodní elektrárnou a v odpadu pod ní.

- **Průtok** – množství vody protékající profilem za jednu sekundu

Voda, která protéká z horní do dolní zdrže, vykonává práci. Pokud je spád využívaný vodní elektrárnou H (m) a průtok turbínou Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), vypočteme teoretický výkon

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \text{ (W)} \quad (2.7)$$

kde ρ – měrná hmotnost vody

g – gravitační zrychlení

Vzorec lze upravit na tvar:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \text{ (kW)} \quad (2.8)$$

Skutečný výkon i energie vodního toku budou menší, jelikož při změně hydraulické energie na mechanickou v turbíně a mechanické energie na elektrickou v generátoru vznikají ztráty. Pro odhady výkonu malé vodní elektrárny se používají tyto empirické vztahy

$$P = (5 \div 7) \cdot Q \cdot H \text{ (kW)} \quad (2.9)$$

Základními veličinami pro výpočet jsou:

- **Průtok turbínou** – celkové množství vody protékající turbínou za jednu sekundu. Je to úhrnné množství vody potřebné pro provoz turbíny při daném zatížení, včetně ztrát.
- **Hltnost** – maximální průtok turbínou při určitém spádu
- **Jmenovitá hltnost** – průtok turbínou při jmenovitém spádu (nejvyšší účinnost)
- **Hltnost při maximálním spádu** – největší zaručený průtok při maximálním spádu
- **Průtoková kapacita** – největší průtok, který projde všemi vodními motory hydroenergetického díla. Určení průtokové kapacity je technicky a ekonomicky velmi závažné a obtížné, protože záleží na mnoha parametrech a činitelích.
- **Hrubý spád H_b** – celkový statistický spád mezi dvěma profily úseku řeky. Je určen jako rozdíl hladin v těchto profilech při nulovém průtoku vodní elektrárnou.
- **Užitný spád H** – výškový rozdíl mezi čárami energie před vodním motorem a za ním. Je to hrubý spád, od něhož jsou odečteny hydraulické ztráty, které se nezahrnují do účinnosti turbíny.

U turbíny se obvykle udávají tyto užité spády:

- Návrhový spád H_n
- Maximální spád H_{max} – nejvyšší užité spád, při kterém je turbína schopna pracovat
- Jmenovitý spád H_j – při tomto spádu má turbína nejlepší hydraulické vlastnosti

Užité spád se dá určit pomocí Bernoulliho rovnice pro vstupní a výstupní profil turbíny za dynamického režimu, to znamená, když průtok turbínou není nula. Uvedeme vzorec pro určení tohoto užitého spádu pro hlavní typy vodních turbín.

Pro přetlakové, to znamená reakční turbíny, platí vztah

$$H = H_b + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2 - \alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - \sum h_{z1-n} \quad (2.10)$$

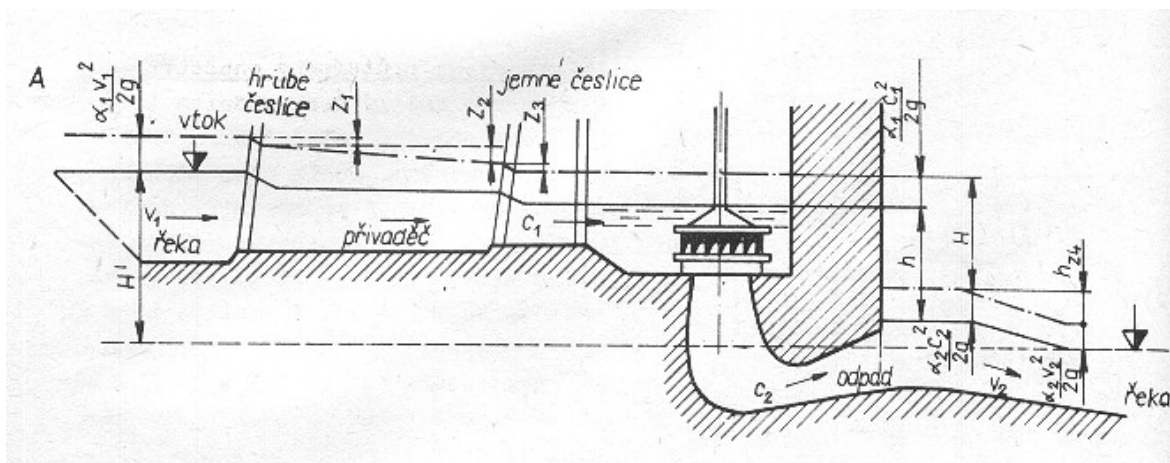
kde H – užité spád (m)

α - Coriolisovo číslo

$\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g}, \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g}$ - rychlostní výšky na začátku a konci úseku (m)

$\sum h_{z1-n}$ - ztráty spádu před vstupem do turbíny, které jsou způsobeny v česlích, přivaděči, v tlakovém potrubí a uzávěrech. V odpadu to jsou pak ztráty, které jsou způsobené třením v odpadním kanálu, změnou průtokového průřezu, zakřivením apod.

Užité spád H se určí tak, že k hrubému spádu H_b , který je známý, se připočte rozdíl rychlostí výšek na začátku a na konci úseku řeky a odpočítáme od něj součet všech ztrát. Obvykle to jsou tyto ztráty: vtoková ztráta, ztráta třením po délce přivaděče, ztráta v česlích a na vtoku do kašny turbíny a ztráty v odpadu (třením, změnou směru, změnou průtočného profilu, aj.). Všechny tyto ztráty jsou udávány v metrech vodního sloupce. Ztráty, které jsou v savce a spirále se započítávají do účinnosti turbíny.



Obr. 2.2 Schéma pro stanovení čistého užitého spádu pro přetlakovou turbínu v otevřené kašně [2]

Pro rovnotlaké, to znamená akční turbíny, platí vztah

$$H = H_b + \frac{\alpha_0 \cdot v_0^2}{2 \cdot g} - \sum h_{z1} - h' \quad (2.11)$$

kde H – užitný spád (m)

α - Coriolisovo číslo

$\frac{\alpha_0 \cdot v_0^2}{2 \cdot g}$ - rychlostní výška na začátku úseku (m)

$\sum h_{z1}$ - součet hydraulických ztrát v přívodu vody (m)

h' - výška dotykového bodu výtokového paprsku z dýzy s dělicí kružnicí oběžného kola

V rovnici (2.11) zanedbáváme kinetickou energii vody, která opouští výstupní hrany lopatek turbíny. Oběžné kolo akčních turbín by nemělo brodit ve vodě, proto výšku h' je třeba brát jako ztracenou. Užitný spád horizontální Peltonovy turbíny, která má větší počet trysek na jedno oběžné kolo, se určí tak, že vypočteme aritmetický průměr užitných spádů jednotlivých trysek.

Pak dospějeme k tomu, že pokud je užitný spád velmi malý, pro zajištění přijatelného výkonu by vyžádaly velké průměry oběžného kola. To by bylo nepřijatelné z mnoha hledisek, například z technologického a ekonomického hlediska. Proto se doporučuje, že u malých turbín nemá být užitný spád menší než 1,5 m a u velkých turbín 3 m.

- **Účinnost turbíny η_t** – poměr skutečného výkonu turbíny P (měřeného na hřídeli) k teoretickému výkonu.

$$\eta_t = \frac{P}{P_0} \quad (2.12)$$

Do celkové účinnosti turbíny musíme zahrnout všechny hydraulické ztráty η_h a objemové ztráty η_v , ke kterým dochází průtokem vody jednotlivými částmi turbíny i všechny mechanické ztráty η_m , které vznikají třením v ložiskách a ucpávkách turbíny. Pak vztah pro celkovou účinnost turbíny má tvar

$$\eta_t = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (2.13)$$

Hodnota celkové účinnosti turbíny se u dobře navržených turbín a optimálních hodnot průtoků pohybuje v mezích $\eta_t = 0,8$ až $0,94$. Přičemž u turbín o větších výkonech se dosahuje vyšší účinnosti.

Mechanický výkon turbíny je předáván na generátor, v němž se mění mechanický výkon na elektrický. Výkon generátoru se měří na svorkách. Účinnosti generátorů se pohybují v rozmezích $\eta_g = 0,85$ až $0,97$. Výkon dodávaný do sítě je ještě ovlivněn účinností transformátoru, která je $\eta_{tr} = 0,92$ až $0,98$. Další ztráty jsou ztráty převodem η_p , ale pokud je generátor na společné hřídeli, pak je tato účinnost 100%.

Výsledná účinnost vodní turbíny a generátoru (hydroagregátu) je dána vztahem

$$\eta_c = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_p = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_p \quad (2.14)$$

- **Výkon na prahu vodní elektrárny P**

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \text{ (kW)} \quad (2.15)$$

Přičemž celkový výkon vodní elektrárny je dán součtem výkonů jednotlivých hydroagregátů.

- **Instalovaný výkon vodní elektrárny P_i**

$$P_i = 0,95 \cdot P \text{ (kW)} \quad (2.16)$$

Z ekonomických důvodů se obvykle v praxi volí instalovaný výkon P_i menší o 5 % než maximální výkon P_{\max} vodní elektrárny.

- **Výroba vodní elektrárny**

$$A = P \cdot T \text{ (kWh)} \quad (2.17)$$

kde P – výkon

T - počet hodin dodávky elektrické energie

2.3. Dělení vodních elektráren podle spádu

2.3.1. Nízkotlaké vodní elektrárny

U tohoto typu elektráren voda přitéká do budovy elektrárny přivaděčem s volnou hladinou. Ve většině případů je maximální spád do 25 metrů.

2.3.2. Vysokotlaké vodní elektrárny

Přívod vody do budovy elektrárny je obvykle proveden tlakovým potrubím. Spády pro vysokotlaké vodní elektrárny se pohybují nad 50 metrů.

2.4. Dělení vodních elektráren podle způsobu provozu

Malé vodní elektrárny navrhujeme nejčastěji jako průběžné, nízkotlaké bez akumulace. Umisťují se u jezu nebo v těsné blízkosti, někdy i v jeho spodní stavbě (jezové vodní elektrárny). Využívá se spádu vzniklého vzdutím vodní hladiny, který je závislý na průtoku. Někdy tyto elektrárny realizujeme u vodohospodářských nádrží, které slouží pouze pro zpracování asanačních průtoků nebo průtoku pro jiné vodohospodářské účely. Také derivační středotlaké nebo vysokotlaké elektrárny s odběrem vody z volného toku nebo jezu mohou pracovat pouze průběžně.

2.4.1. Průtočné vodní elektrárny

Tyto průtočné vodní elektrárny jsou bez akumulace, které využívají pouze množství vody protékající řečištěm, až do úplné hltlosti turbín, na kterou je elektrárna dimenzována. Zbytek průtoku nad využitelnou mezí, která je dána hltlostí vodních turbín, přepadá bez užítku přes jez. Elektrárny pracují v základní části denního diagramu elektrického zatížení a jsou nejčastěji nízkotlaké.

2.4.2. Akumulační vodní elektrárny

Jsou to elektrárny s přirozenou nebo umělou akumulací, které jsou schopny

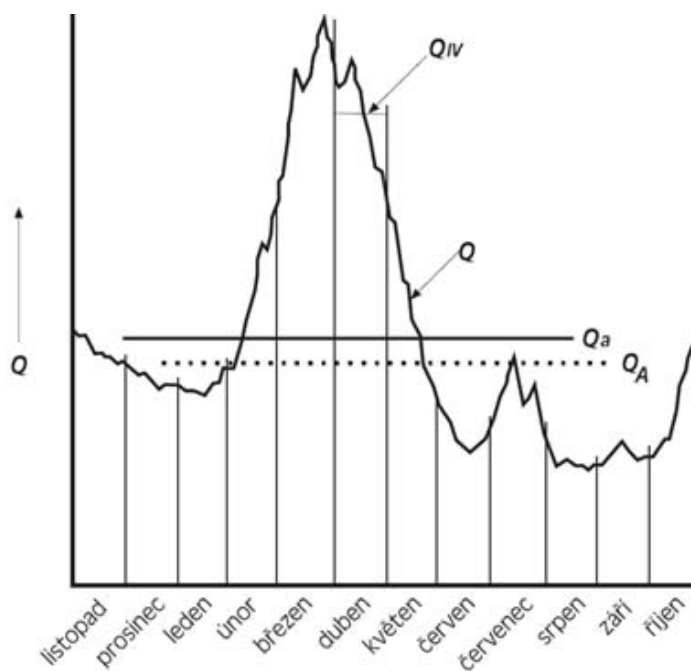
regulovat a udržovat průtoky vodního toku. Tyto elektrárny jsou nejčastěji umístěny buď pod přehradou (přehradní) nebo jsou s nádrží spojeny delším tlakovým přivaděčem (derivační). Jsou obvykle navrhovány jako špičkové nebo pološpičkové, mají zpravidla vyšší instalovaný výkon a pracují pouze několik hodin denně. Velikost instalovaného výkonu závisí na průtočném poměru toku a velikosti objemu akumulací nádrže.

2.4.3. Přecherpávací vodní elektrárny

Přecherpávací elektrárny pracují s odběrem akumulované vody, která je přecherpávána z dolní nádrže do nádrže horní a následně je využita energie vody v horní nádrži. Přecherpávání vody do horní nádrže probíhá zejména mimo špičku (v noci, v poledne). Tento typ elektrárny je typický pro práci ve špičkové a v pološpičkové části denního diagramu elektrického zatížení. Typická je krátkodobá regulace průtoku v rámci uzavřeného kruhu

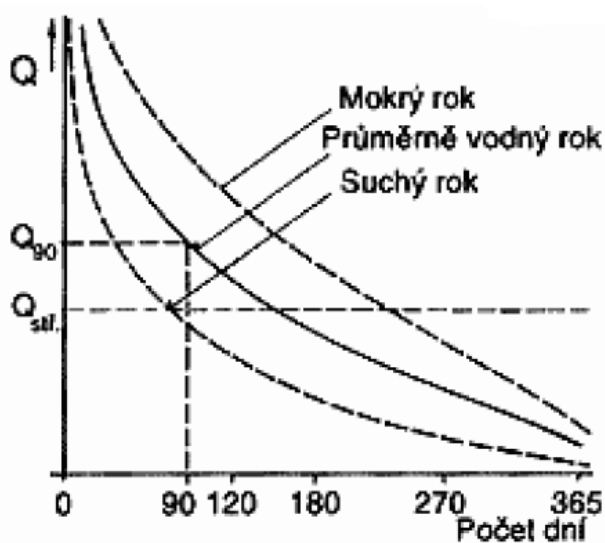
2.5. Řešení průběžné vodní elektrárny

Průběžná malá vodní elektrárna neumožňuje akumulaci vody. Přesné průtoky vody řečištěm je možno získat u Českého hydrometeorologického ústavu nebo u příslušného povodí řeky. V tomto grafu je průtok Q , dlouhodobý průměrný roční průtok Q_a , dlouhodobý průměr Q_A a průměrný měsíční průtok za měsíc duben Q_{IV} . Příklad proměnlivosti průtoku v závislosti na měsících je na obrázku 2.3.

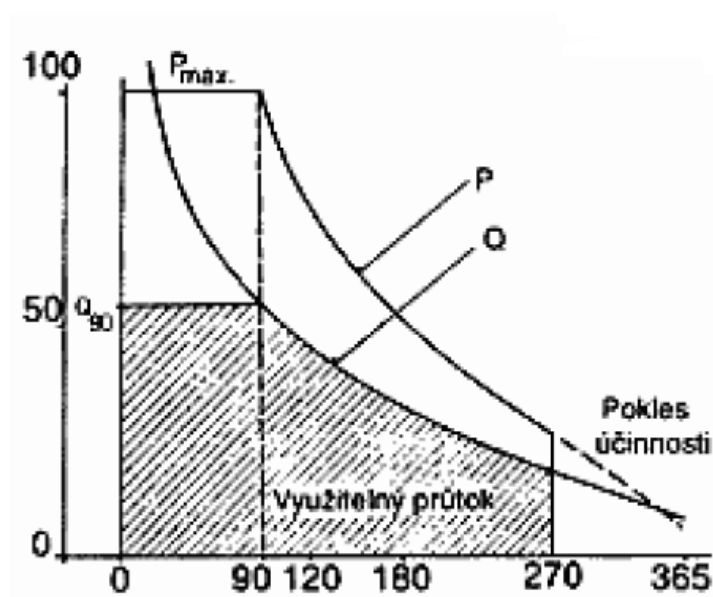


Obr. 2.3 Proměnlivost průtoku v závislosti na měsících [14]

Jako základní hydrologický podklad pro řešení vodní elektrárny je křivka překročení průtoků v průměrném vodním roce. Pro využití energie vody jsou nejdůležitější tzv. M - denní průtoky, které nám udávají zaručené průtoky po určitý počet dní v roce. Obvyklé dělení M – denních průtoků je po 30 dnech, není ale podmínkou. Odtoková křivka má na ose x počet dní a na ose y průtoky Q viz. obrázek 2.4 a na následujícím obrázku obr.2.5 je zaznačen využitelný průtok a přímka výkonů. Vyrobená energie je přímo úměrná ploše pod křivkou.



Obr. 2.4 Odtoková křivka [19]



Obr. 2.5 Využitelný průtok, přímka výkonů [19]

Určíme využitelný průtok vodní elektrárnou, to znamená hltnost instalovaných turbín a to v okolí bodu největší křivosti odtokové křivky. V podmínkách České republiky to bývá obvykle v rozmezí Q_{90} a Q_{120} . Pro přesné určení využitelného průtoku dojdeme technicko-ekonomickým rozбором malé vodní elektrárny. Pro tento rozbor je nutno znát počet soustrojí, typy vodních turbín, typy generátorů, typy transformátorů, popřípadě převody.

Nyní do grafu odtokové křivky zakreslíme obrazec pro rozdělení průtoku pro turbínu, popřípadě více turbín. Z univerzální charakteristiky Kaplanovy turbíny určujeme účinnosti turbíny v jednotlivých bodech odtokové křivky pomocí poměrných hodnot.

Poměrná hodnota průtoku

$$\frac{Q}{Q_{opt}} (-) \quad (2.18)$$

Poměrná hodnota spádu

$$\frac{H}{H_{opt}} (-) \quad (2.19)$$

Výkon na hřídeli vodní turbíny se spočítá podle vzorce

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \text{ (kW)} \quad (2.20)$$

Instalovaný výkon se vypočte jako součet instalovaných výkonů jednotlivých soustrojí. V případě použití jednoho soustrojí se instalovaný výkon rovná výkonu tohoto soustrojí. Výpočet vyrobené elektrické energie je popsán v kapitole 2.2.

Doba ročního využití instalovaného výkonu se vypočte podle vzorce

$$T = \frac{A}{P_i} \text{ (h)} \quad (2.21)$$

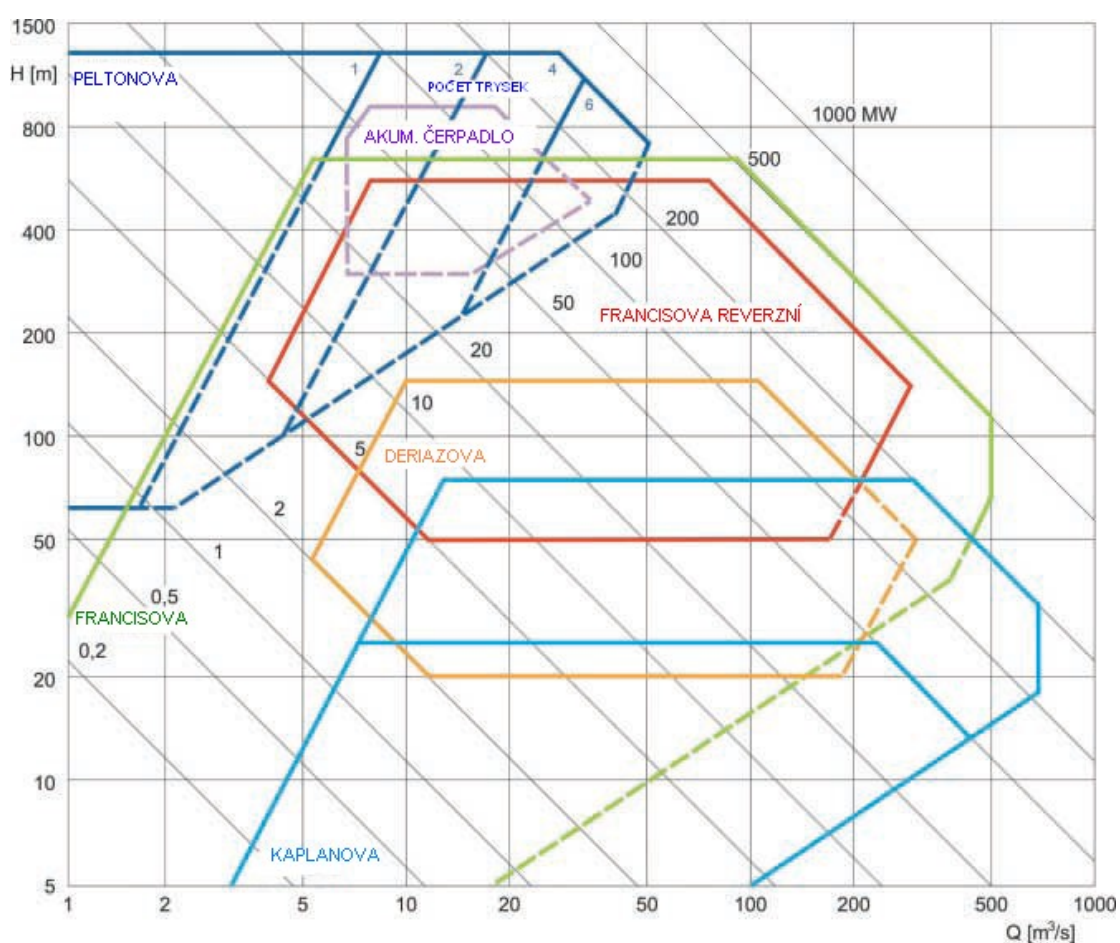
Koeficient ročního využití malé vodní elektrárny se vypočte podle vzorce

$$k_v = \frac{T}{8760} (-) \quad (2.22)$$

3. Strojní část malé vodní elektrárny

3.1. Volba turbíny podle spádu

V hydroenergetice se vyžaduje použít vodní turbíny různých typů, výkonů, rozměrů a konstrukčního řešení. Volba typu turbíny a provedení je zejména dána konkrétní konfigurací terénu a hydrologickými podmínkami v dané lokalitě. Důležité parametry pro volbu turbíny jsou průtok a spád. Na obrázku 3.1 je Q/H diagram pro různé typy vodních turbín. V následující části jsou popsány pouze Kaplanova a Francisova turbína.



Obr. 3.1 Q/H diagram [12]

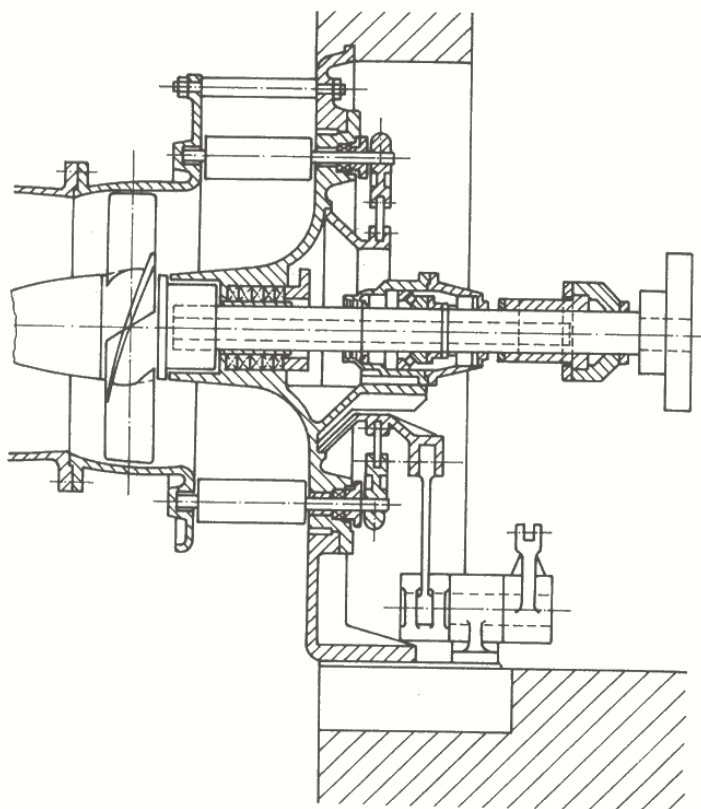
3.2. Turbíny

3.2.1. Kaplanova turbína

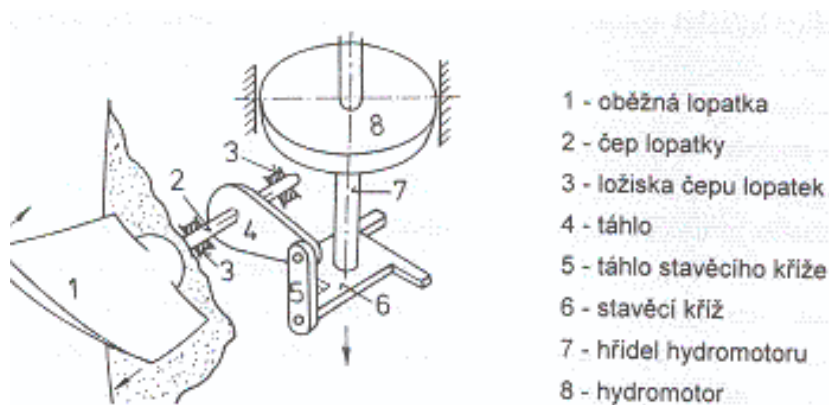
Typická koncepce Kaplanovy turbíny pro malé vodní elektrárny je na obrázku 3.2. Tato turbína je v našich podmínkách nejčastěji používána. Používá se zejména pro nejnižší spády až do hranice přibližně 100 m. Horizontální kašnové uspořádání s vnější regulací rozvaděče má takové oběžné kolo, kdy jeho lopatky jsou natáčeny regulačním mechanismem spojeným s přestavnou tyčí. Kaplanovu turbínu lze regulovat i rozváděcími lopatkami. Oba způsoby regulace ale musí být vzájemně svázány regulační vazbou.

Oběžná kola mají malý počet lopatek, který volíme tak, aby byl úměrný spádu. Obvykle volíme minimálně 3 lopatky, maximálně 10 lopatek. Jestliže máme menší počet lopatek, v tom případě se lopatky nepřekrývají a oběžné kolo je „průhledné“. Turbínový prostor je ohraničen nábojem oběžného kola a pláštěm komory oběžného kola. Náboj i plášť vždy přecházejí plynule do víka turbíny. Poměr průměru náboje k průměru komory je dán počtem lopatek turbíny takovým způsobem, aby v náboji bylo dostatek prostoru pro uchycení lopatek a regulační mechanismus. Náboj, plášť náboje a komory se obvykle u malých soustrojí vyrábějí válcové, u větších soustrojí bývají kulové.

Ve volném prostoru mezi oběžnými lopatkami a komorou někdy může dojít ke spárové kavitaci, která je důsledkem velkých rychlostí vody ve spáře. Kavítace se projevuje na stěnách komory a na spodní straně konce oběžných lopatek. Spárovou kavitaci můžeme omezit úpravou konce lopatky oběžného kola. Je vhodné protáhnout náboj oběžného kola i do vstupního profilu savky, a to z toho důvodu, aby nedocházelo k rychlému zvětšování průtočných ploch. Mohlo by to mít za následek odtržení proudu vody od stěn savky. U kaplanových turbín k natáčení lopatek oběžného kola používáme většinou hydraulický pohon. Na obrázku 3.3 je schéma zařízení pro natáčení lopatek.



Obr. 3.2 Horizontální kašnová Kaplanová turbína [1]



Obr. 3.3 Zařízení pro natáčení lopatek Kaplanovy turbíny [4]

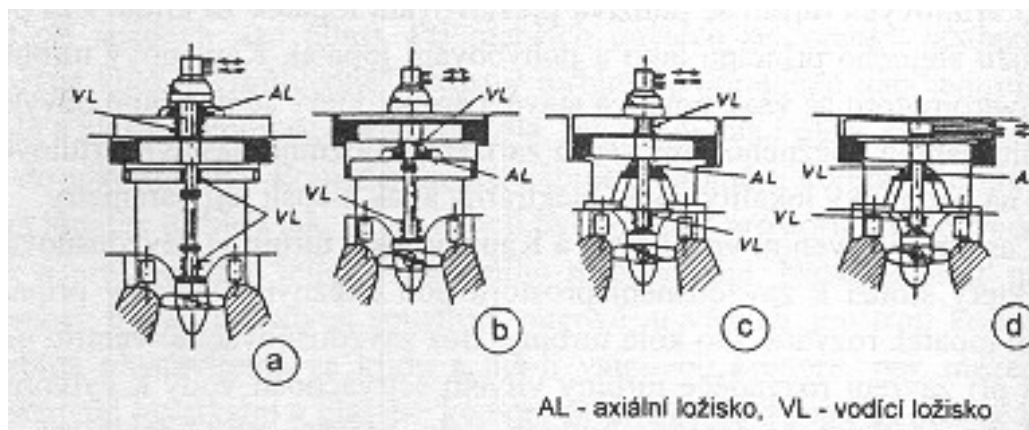
Obvyklým a častým vybavením vrtulových a Kaplanových turbín bývá zavzdušňovací ventil, který používáme proto, abychom zavzdušnili prostor pod oběžným kolem v případě uzavření rozváděcích lopatek kola turbíny. Pokud by nebyla turbína vybavena tímto ventilem, mohlo by dojít při zavření rozvaděče turbíny vlivem setrvačností vody k takovému podtlaku, že bychom dosáhli hodnoty tlaku nasycených vodních par.

Důsledkem nasycených vodních par se může přetrhnout vodní sloupec, který se po vyčerpání energie začne vracet k oběžnému kolu a může dojít k nárazu vodního sloupce na vodní kolo i k nadzvednutí celého soustrojí. Ventil se umísťuje na víko turbíny. Pro návrh zavzdušňovacího ventilu uvažujeme rychlost proudění vzduchu 250 m.s^{-1} .

Tyto turbíny lze použít s vertikální i horizontální osou rotace. U větších soustrojí navrhujeme svislou osu. U menších soustrojí navrhujeme horizontální osu, jelikož tato horizontální osa klade menší náročnost na stavební a základové práce.

Soustrojí s vertikálními Kaplanovými turbínami dělíme podle umístění ložisek:

- Axiální ložisko s vodícím ložiskem je vždy umístěno nad generátorem. Další vodící ložiska jsou pod generátorem a na víku turbíny. Pokud použijeme toto uspořádání přibližná výška soustrojí je až 4,2 násobkem průměru oběžného kola turbíny. Obvykle se toto uspořádání používá pro menší stroje.
- Axiální ložisko, které je spojené s vodícím ložiskem, je pod generátorem. Rotor generátoru je na hřídeli uchycen letmo.[4] Přibližná výška tohoto soustrojí je 3,8 násobkem průměru oběžného kola turbíny. Zatížení, které je na axiálním ložisku, přenášíme přímo do betonu šachty turbíny přes podpěrnou konstrukci.
- Axiální ložisko je pod generátorem na konstrukci, která je spojena s víkem turbíny. Další vodící ložiska jsou nad generátorem a na víku turbíny. Hřídel při tomto uspořádání není dělena a výška soustrojí je asi 2,6 násobkem průměru oběžného kola turbíny. Tohoto uspořádání se používá zejména u velkých soustrojí, která mají průměr oběžného kola větší než 4 metry.
- Nejúspornějším uspořádáním je uspořádání, které je podobné předchozímu typu. Rozdíl je pouze v tom, že generátor je uchycen letmo na hřídeli. Vodící ložisko s axiálním ložiskem jsou spojeny pod generátorem, další vodící ložisko je na víku turbíny. Výška takového soustrojí je asi 2 násobkem průměru oběžného kola turbíny. Hlavní použití je u odkrytých typů vodních elektráren.



Obr. 3.4 Schéma uspořádání soustrojí s Kaplanovými turbínami [4]

3.2.2. Francisova turbína

Francisova turbína byla v minulosti nejpoužívanější typ přetlakové turbíny pro malé vodní elektrárny. Tato turbína pokrývala oblast měrných otáček n_q od 0,05 do 0,36. Pro rozmezí těchto otáček bylo řešeno oběžné kolo v různých variantách. Turbína byla využívána pro hodnoty měrné energie $E > 20 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Nyní se Francisova turbína používá pro vyšší měrné energie než v minulosti, a to energie v rozmezí 50 až $3000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Avšak oblast měrných otáček je 0,08 až 0,26.

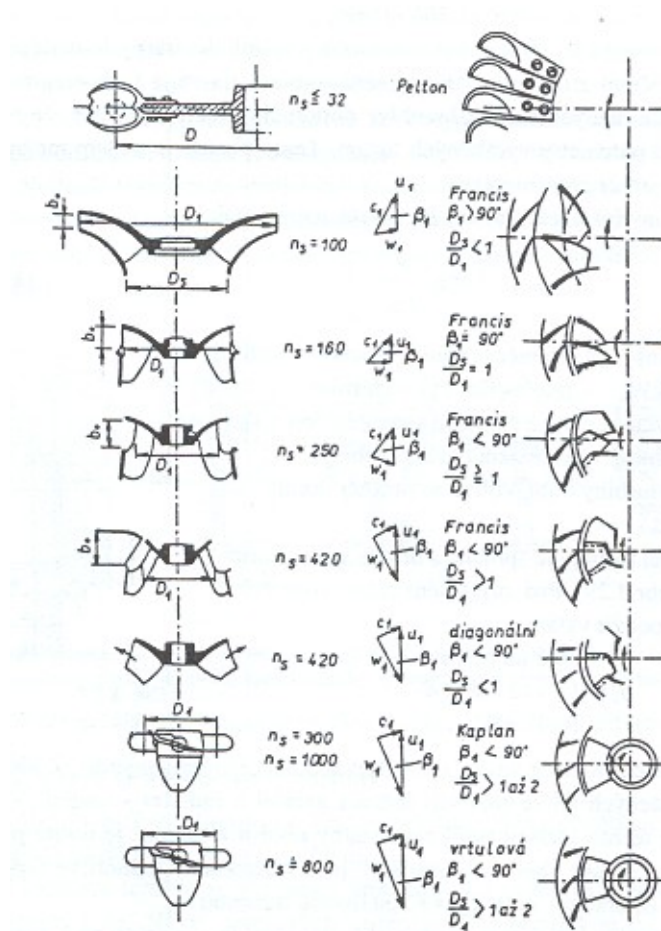
Francisovy turbíny jsou používány pro spády přibližně do 500 metrů. Minimální spád těchto turbín je asi 100 metrů. Pokud jsou spády nižší je, vhodnější volit jiný typ turbíny.

Je možné horizontální nebo vertikální uspořádání Francisovy turbíny. Přívod vody k oběžnému kolu může být řešen buď pomocí spirály, nebo pokud jsou menší spády odkrytou kašnou.

Voda je přiváděna na oběžné kolo pomocí rozváděcího kola radiálním směrem a v oběžném kole se tento směr mění na axiální. Lopatky rozváděcího kola jsou obvykle řešeny tak, že je možné jejich natáčení kolem čepu a tímto způsobem regulujeme průtok vody turbínou. Oběžné kolo turbíny je složeno z náboje a vnějšího věnce, který přechází v kotouč. Lopatky oběžného kola jsou z ocelového plechu, ale v poslední době je trend tyto lopatky odlévat. Oběžné kolo je nalisováno na hřídeli.

V závislosti na rychloběžnosti turbíny se používají různé tvary lopatek oběžného kola. Změna tvaru oběžného kola v závislosti na rychloběžnosti turbíny je na obrázku 3.5. Z obrázku je možné vidět souvislost mezi specifickou rychloběžností a změnou směru

průtoku oběžným kolem. Mění se i poměr D_s/D_1 , který představuje poměr průměru výstupního profilu turbíny a vstupního průměru. U pomaloběžných turbín je tento poměr menší než 1, to znamená, že převládá radiální směr proudění. U rychloběžných turbín je tento poměr větší než 1.



Obr. 3.5 Tvar oběžných kol turbín vzhledem k rychloběžnosti [4]

Podle rychloběžnosti dělíme Francisovy turbíny:

- Normální – oběžné kolo se otáčí souhlasně s potenciálním vírem proudu.

$$u_1 = c_{u1}$$

$$\frac{D_s}{D_1} = 1$$

$$\beta = 90^\circ$$

- Volnoběžné – oběžné kolo se otáčí pomaleji než potenciální vír proudu.

$$u_1 \rangle c_{u1}$$

$$\frac{D_s}{D_1} \rangle 1$$

$$\beta \langle 90^\circ$$

- Expresní – to jsou rychloběžné turbíny, které mají velký počet specifických otáček.

$$n_s = 400 \div 500 \text{ min}^{-1}$$

Základní rozměry turbíny vodní elektrárny jsou určovány přepočtem z modelových rozměrů turbíny. Podle různých autorů existuje řada empirických vzorců, které je ale možno použít pouze v případě, pokud neznáme parametry turbín uváděné výrobcem. Pomocí těchto empirických vzorců můžeme určit pouze přibližné rozměry turbíny.

Návrh hřídele turbíny

$$d = 10 \cdot \left[500 \cdot \frac{P_{\max}}{Pa \cdot n} \right]^{\frac{1}{3}} \text{ (m; kW, kp} \cdot \text{cm}^{-2}, \text{min}^{-1}) \quad (3.1)$$

kde d – průměr hřídele Francisovy turbíny

P_{\max} – maximální výkon turbíny

Pa – mez pevnosti použité oceli v kroucení

n – provozní otáčky turbíny

Je-li hřídel dutá, volíme průměr dutiny

$$d_u = 0,3 \cdot d \quad (3.2)$$

Podle celkového uspořádání soustrojí je závislé umístění ložisek. Ložiska dělíme na axiální a radiální – vodící.

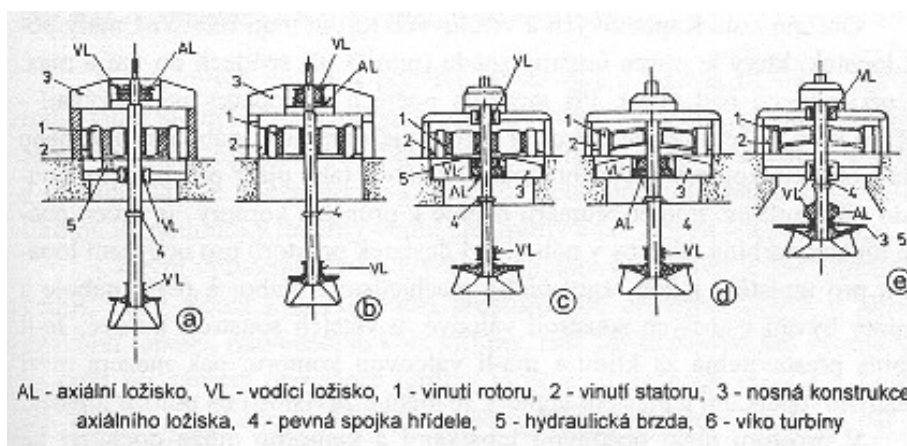
Soustrojí s Francoisovými turbínami dělíme podle dispozičního uspořádání:

- Axiální ložisko se závěsnou konstrukcí je nad generátorem. Vodící ložisko je součástí axiálního ložiska. Druhé ložisko je pod generátorem a třetí je umístěno nad víkem. Tento typ uspořádání je vhodný pro velké rychlosti soustrojí.
- Pokud jsou kratší rozměry hřídele, můžeme vodící ložisko vypustit.
- Velká soustrojí s malými provozními otáčkami mají axiální ložisko umístěno pod generátorem. U tohoto typu uspořádání je závěsná konstrukce lehčí.
- U deštníkových generátorů, kde lze umístit rotor letmo na horním konci hřídele nad

axiálním ložiskem, se používá uspořádání, které je na obrázku 3.5. Tento typ používáme u soustrojí s nízkými provozními otáčkami.

- Uspořádání se závěsným ložiskem na víku turbíny patří mezi nejmodernější typy. Nosná konstrukce je nahrazena víkem turbíny.

Nejlepší dynamickou stabilitu soustrojí poskytuje uložení podle obrázku 3.6 a. Pokud volíme ostatní typy uspořádání, ušetříme na konstrukcích, přičemž nehrozí nebezpečí poruchy vlivem prosáklého oleje z ložiska do vinutí generátoru.



Obr. 3.6 Dispoziční uspořádání soustrojí s Francoisovou turbínou [4]

3.3. Kavítace

Pod pojmem kavítace rozumíme souhrn nepříznivých jevů při proudění vody. Tyto jevy jsou vyvolány zejména podtlaky a způsobují narušování obtékaných objektů.

Pokud nastane z jakékoliv příčiny v některém bodu uvnitř turbíny snížení tlaku, potom se z proudící vody začnou vylučovat bublinky vodní páry a plynů rozpuštěných ve vodě. K vytvoření bublinek je postačující, aby byl tlak v některém místě nižší než napětí vodních par. Například při teplotě $t = 10^{\circ}C$ je pružnost vodních par udána tlakem 1200 Pa. Pokud je v některém místě tlak nižší než 1200 Pa může nastat vytváření bublinek vodní páry a plynů rozpuštěných ve vodě. Bublinky se pak dostávají do míst s vyšším tlakem, kde nastává jejich imploze, pára kondenzuje a do takto uvolněných míst se dostává voda. To způsobuje velké rázy, jejichž důsledek je chvění lopatek a hluk. Další negativní důsledek tohoto jevu je vyhlodávání lopatek, které může za poměrně krátkou dobu způsobit poškození vodní turbíny. Poškození vodní turbíny je převážně způsobeno mechanickými účinky rázu. Dále však působí i korozivní účinky, které jsou vyvolány termoelektrickými jevy následkem zahřátí mechanickými rázy.

Abychom omezili účinky kavitace, musíme zvolit správnou výšku sací trouby a dále použít správné slitiny odolné proti rázu při výrobě turbínových lopatek. Přesnost opracování turbínových lopatek má také vliv na odolnost proti kavitaci. Povrch lopatek by měl být co nejjemnější.

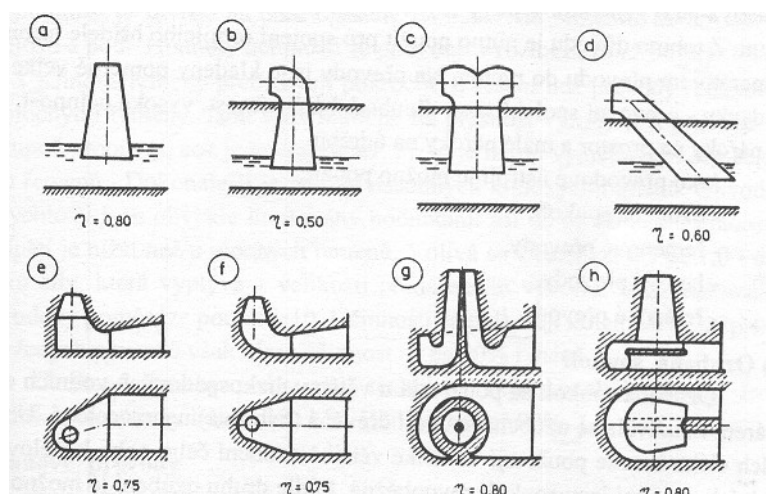
3.4. Savky přetlakových turbín

Savky přetlakových turbín slouží k odvedení vody od turbíny. Pomocí savky můžeme využít část energie vody, se kterou opouští voda vodní turbínu. Použití má zejména význam se zmenšujícími se spády, u vodní elektrárny s malým spádem můžeme v savce využít 30 až 50 % energie vody.

Z konstrukčního hlediska je to zařízení, které slouží k hermetickému propojení prostoru pod oběžným kolem turbíny a s dolní vodou. Zároveň umožňuje převedení veškeré vody, která prochází turbínou do dolní vody s minimem ztrát.

Základní funkce savky jsou:

- zajištění plného využití hrubého spádu, a to i tehdy, je-li turbína situována nad dolní vodou
- využití co největší kinetické energie vody, která již opustila oběžné kolo
- použití savky umožní umístit turbínu nad dolní vodu, takže je možnost provádět opravy a revize v suchu



a) kónická savka, e, f) kolenová savka, g) hydrokon

Obr. 3.7 Používané typy savek [4]

3.5. Převody

Převody jsou důležitou technologickou částí vodní elektrárny. U velkých soustrojí bývá nejčastěji přenos zajištěn přímým spojením hřídele turbíny s generátorem, jenž bývá konstruován na otáčky turbíny. U malých vodních elektráren se obvykle jako generátor používá asynchronní motor s velkými otáčkami. Proto je nutné použít pro spojení hřídele turbíny s generátorem převodu do rychla. Na převody jsou kladeny velké nároky, jako je provozní spolehlivost, dlouhá životnost, vysoká účinnost, snadná údržba apod.

3.5.1. Ozubená soukolí

Ozubená soukolí se dříve používala u nízkospádových vodních elektráren. Používají se nejčastěji ozubení čelní nebo kuželová. Pokud je použito čelního ozubení jsou soukolí rovnoběžná. Podle druhu ozubení můžeme rozlišit zuby přímé, šikmé a šípové.

Účinnost je závislá na druhu ozubení, přesnosti výroby, drsnosti povrchu a na opotřebení. Hodnota účinnosti se u čelních a kuželových ozubení pohybuje až okolo 97 %, u hypoidních ozubení 94 až 96 %. Na jednom stupni lze dosáhnout převodu 1 : 8 až 1 : 10.

3.5.2. Řemenové převody

Jsou nejčastěji používanými převody. Jako nosné prvky řemenů se používají uhlíková nebo polyamidová vlákna a textilní vložky. Podle konstrukce rozlišujeme ploché, klínové a ozubené řemeny.

Plochými řemeny lze dosáhnout převodu až 1 : 15. Obvodová rychlost řemenů je maximálně $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Účinnost se pohybuje v rozmezí 96 až 98 %.

Klínové řemeny jsou náročnější na přesnost výroby. Při provozu dochází k postupnému protahování řemenů, a proto musíme vyměňovat vždy celou sadu řemenů. Lepší je použití násobných klínových řemenů. Obvodové rychlosti se pohybují v rozmezí 40 až $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Maximální převodový poměr je 1 : 10 a účinnost 98 %.

Ozubené řemeny jsou nejdokonalejším řešením, jsou vhodné použít i pro výkony kolem 300 kW. Účinnost je až 99 %.

3.5.3. Lanové převody

Tyto převody se dnes již nevyužívají. K přenosu sil sloužily lanovice s drážkami a používala se lana bavlněná, konopná a později ocelová. V současnosti se tyto převody používají pro výtahy a jeřáby, kde dosahují účinnosti až 99 %. Maximální převodový

poměr je 1 : 15.

3.5.4. Řetězové převody

Řetězové převody mají nejmenší zastavěný prostor. Nejčastěji se pro převodová soustrojí používají článkové řetězy jednořadé a víceřadé. Jednořadé řetězy lze použít jen při vodorovné poloze os ozubených kol, víceřadé řetězy i ve vertikální poloze hřídelí ozubených kol. Počet článků řetězů je vždy sudý.

Účinnost těchto převodů dosahuje až 98,5 %, je ale závislá na mazání a počtu zubů. Řetězové převody lze použít pro výkony až 5000 kW.

3.6. Uzávěry

Uzávěry tvoří vždy součást vodního vybavení vodní elektrárny. Existuje celá řada konstrukčních systémů a uspořádání, které můžeme rozdělit:

- Podle charakteru provozu – regulační a neregulační
- Podle funkce – provozní, nouzové a rychlouzávěry
- Podle konstrukce – stavidlové, hradidlové, hradlové, kladkové, klínové, válcové a segmentové
- Podle velikosti tlaku vody – trubní tlakové a kanálové o volné hladině

4. Elektrická část malé vodní elektrárny

4.1. Generátory

V malých vodních elektrárnách se k výrobě používají buď asynchronní nebo synchronní generátory. [9]

Volba elektrického napětí generátoru U je závislá na velikosti výkonu P . V tabulce 4.1 jsou uvedeny orientačně napěťové hladiny pro jednotlivé rozmezí výkonů.

Tab. 4.1 Jmenovité napětí a výkony generátorů [9]

U (V)	400	3000	6000
P (kW)	do 1500	1500 až 2500	nad 2500

Větší napětí než 6 kV se skoro nepoužívá z důvodů velké tloušťky izolace pro tyto vyšší napěťové hladiny a tím i zhoršení účinnosti generátorů a vyšší investiční náklady.

4.1.1. Asynchronní generátor [7]

Rotor asynchronního stroje není elektricky spojen se statorem. [11] Výkon je do rotoru předáván ze statorového vinutí pomocí elektromagnetické indukce, proto tyto stroje nazýváme jako indukční stroje. Princip stroje je tedy založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů, které vyvolá na rotoru toto točivé magnetické pole. Velikost magnetické vazby závisí na velikosti vzduchové mezery, proto volíme vzduchovou mezeru co nejmenší.

U asynchronních strojů existuje stejná magnetická vazba mezi vstupním (umístěným na statoru) a výstupním vinutím (umístěným na rotoru) jako u transformátorů. Hlavní rozdíl je v tom, že výstupní vinutí stroje se otáčí a jeho vodiče se pohybují v magnetickém poli.

Protéká-li statorovým vinutím proud I_1 , vytvoří magnetomotorická síla, kterou je možné si představit jako vektor \vec{F}_{m1} , který se otáčí v prostoru úhlovou rychlostí

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \frac{1}{p} \quad (4.1)$$

Rotor se otáčí ve stejném smyslu úhlovou rychlostí

$$\omega_1 = \omega_2 \cdot (1 - s) \quad (4.2)$$

kde skluz s je pokles otáček

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.3)$$

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (4.4)$$

n_s jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole

p počet pólových dvojic stroje

f_1 statorová frekvence

ω_1 úhlová rychlost magnetického pole statoru

ω_2 úhlová rychlost magnetického pole rotoru

V rotoru se bude indukovat napětí o kmitočtu

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (4.5)$$

Rotorovým vinutím (tyčemi) budou protékat proudy, které vytvoří magnetomotorickou sílu rotoru. Tuto sílu si je možno představit jako vektor \vec{F}_{m2} , který se

otáčí vůči rotoru rychlostí

$$\omega_s = s \cdot \omega_1 \quad (4.6)$$

Protože se rotor otáčí ve stejném smyslu úhlovou rychlostí ω_2 , bude výsledná rychlost vektoru magnetomotorické síly \overline{F}_{m2} proti statoru rovna

$$\omega_2 + \omega_s = \omega_1 \cdot (1 - s) + s \cdot \omega_1 = \omega_1 \quad (4.7)$$

Vektory magnetomotorické síly \overline{F}_{m1} i rotoru \overline{F}_{m2} se při jakémkoliv skluzu budou otáčet ve stejném smyslu konstantní úhlovou rychlostí ω_1 . Pokud tyto dvě síly sečteme, dostaneme výslednou magnetomotorickou sílu

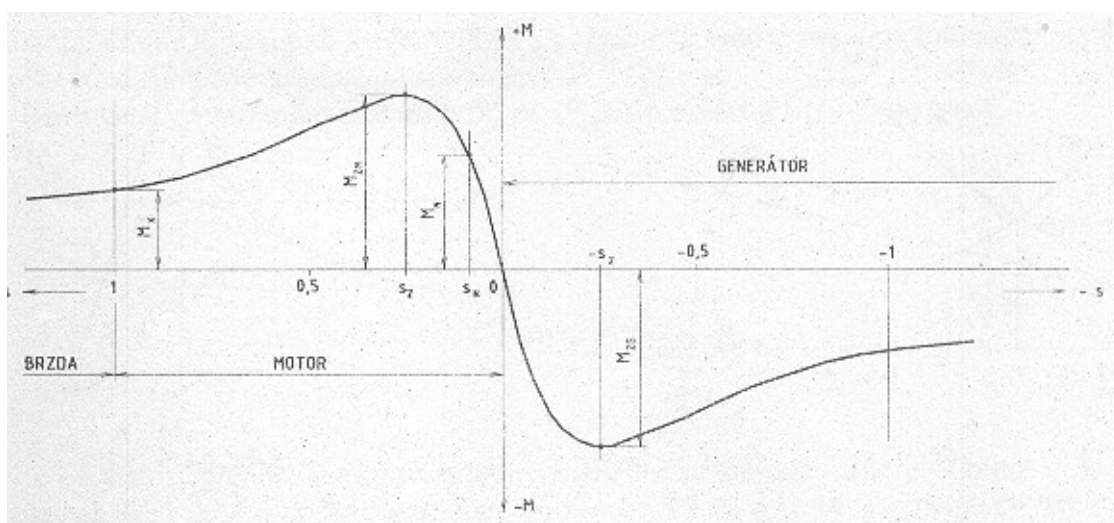
$$\overline{F}_{m0} = \overline{F}_{m1} + \overline{F}_{m2} \quad (4.8)$$

Tato výsledná magnetomotorická síla nám budí točivé magnetické pole.

Vektory magnetomotorické síly byly uvažovány jako prostorové vektory. Je možno si však tyto prostorové vektory vyjádřit i jako časové vektory tzv. fázory.

Asynchronní generátor se v principu neliší od běžného asynchronního motoru. V případě malé vodní elektrárny je asynchronní stroj mechanicky spojen s turbínou (pohonem). Někteří výrobci respektují rozdílné napěťové poměry asynchronního stroje při generatorickém chodu, v takovém případě je stroj označován v katalogu jako asynchronní generátor.

Pokud asynchronní stroj pracuje v generatorické oblasti, potom je hodnota skluzu menší než nula, jak je patrné z obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Momentová charakteristika [11]

Tyto stroje se mohou lišit svým provedením, nejčastěji jsou používány asynchronní

stroje s kotvou nakrátko, občas jsou používány stroje s vinutým rotorem, to znamená kroužkový stroj. Motory se vyrábí s různým počtem pólů neboli počtem pólových dvojic. Další parametry jsou například výkon, krytí, uchycení, chlazení, účinník atd.

4.1.2. Synchronní generátor

Magnetické pole, které je vybuzečné rotorovým vinutím, se otáčí stálými otáčkami

$$n_1 = n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (4.9)$$

Toto pole indukuje ve vinutí statoru v jedné fázi napětí

$$U_{1f} = 4,44 \cdot \phi \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1} \quad (4.10)$$

V synchronním stroji působí dvě magnetická napětí. [5] První z těchto napětí je vybuzečné vícefázovými proudy a druhé je vybuzečné stejnosměrným napětím v rotoru. V rotoru musíme použít budící vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem. Rotor nemusí být vinutý, někdy používáme rotor s permanentním magnetem. Pokud uvažujeme, že synchronní stroj pracuje jako generátor naprázdno, magnetické pole magnetů obíhá s točícím polem rotoru konstantní rychlostí a do vinutí statoru se indukují napětí. Po zatížení generátoru začne protékající třífázový proud vytvářet své vlastní kruhové točivé magnetické pole, jehož otáčky jsou stejné s otáčkami magnetického pole rotoru.

Pokud zatížíme generátor, otáčky se nezmění, ale magnetická pole jsou vůči sobě posunuta. Obě magnetická pole se přitahují. U synchronních strojů je dán zátěžný úhel β , který nesmí při zatížení překročit určitou hodnotu, protože stroj by vypadl ze synchronismu a to je poruchový stav.

Synchronní generátory se zejména používají ve velkých elektrárnách. U nových malých vodních elektráren se používají jen ve výjimečných případech, protože jsou poměrně drahé a složitější než asynchronní stroje. Synchronní generátory se používaly u starých vodních elektráren, protože byla možnost provozu nezávisle na provozu napájecí sítě. Takže tyto elektrárny dodávaly elektrickou energii i v době výpadku elektrické sítě.

Základní konstrukční rozdíl jednotlivých strojů o stejném výkonu a napětí je v počtu otáček. U klasických a jaderných elektráren se používají takzvané turbogenerátory, to jsou stroje, které mají hladký rotor a vysoké otáčky. U pomaloběžných strojů vodních elektráren se používají stroje, které mají rotor s vyniklými póly.

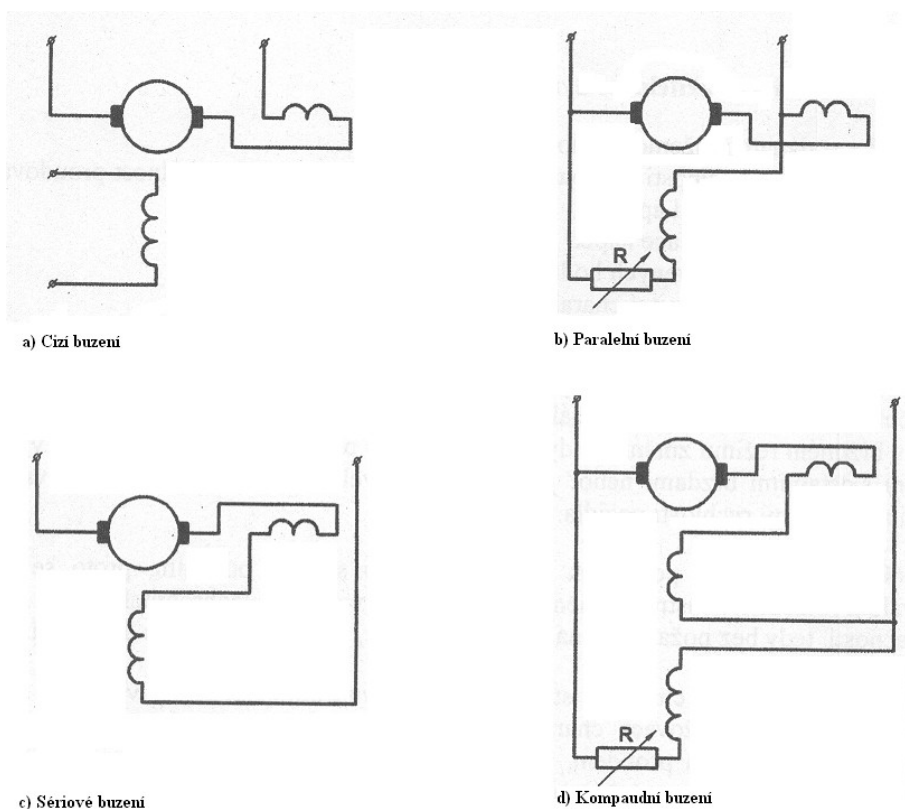
4.1.3. Stejnosměrné dynamo

Stejnosměrné dynamo je svým principem podobné jako synchronní stroj, ale obsahuje některé další prvky, jako jsou mechanický usměrňovač a komutátor. Stejnosměrný stroj má na statoru vždy budící magnety nebo vinutí a na rotoru kotvu. Indukovaný proud v kotvě se usměrňuje pomocí komutátoru.

U malých výkonů můžeme na statoru použít permanentní magnety, kdežto u větších strojů musíme použít stejnosměrné budící vinutí. Tyto stroje rozlišujeme podle toho, jak je provedeno budící vinutí viz obrázek 4.2.

Typy budících vinutí:

- Cizí buzení
- Derivační buzení (paralelní)
- Sériové buzení
- Kompaundní buzení (sdružené)



Obr. 4.2 Způsoby buzení stejnosměrných strojů [6]

Každý takový stroj může pracovat jako generátor, tak jako motor. To, ve kterém režimu stroj pracuje, závisí na způsobu mechanického a elektrického zapojení. Tato vlastnost je pro malé vodní elektrárny důležitá, protože často dynama nepracují do pasivní spotřeby, ale slouží obvykle pro dobíjení baterií. Pokud nastane přerušení vodního toku, například z důvodu zanesení česlí, dynamo přejde do motorického chodu a baterie vybíjí.

4.2. Transformátory

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který slouží pro převod střídavého napětí o stejném kmitočtu z jedné napěťové hladiny do jiné. Velikost transformačního poměru nám určuje poměr vstupního a výstupního napětí. Transformátor jako každý stroj má ztráty, to znamená, že výstupní výkon je právě o tyto ztráty menší než prováděný vstupní výkon. Ovšem transformáty dosahují vysoké hodnoty účinnosti, která dosahuje hodnot až 99 procent. Hodnota účinnosti je závislá na provedení transformátoru, jeho výkonu a dalších parametrech. Při skutečném provozování transformátoru se účinnost mění podle zatížení, a proto se transformátory navrhuje pro tak zvané hospodárné zatížení.

U malých vodních elektráren se používají transformátory na vývodech z elektrárny a také pro krytí vlastní spotřeby. V obvodech vlastní spotřeby jsou používány převážně jednofázové transformátory malých výkonů. Na vývodech z elektrárny používáme třífázové olejové transformátory o větších výkonech. Vinutí silových transformátorů je na straně vyššího napětí vybaveno odbočkami, pomocí kterých můžeme regulovat převod transformátoru, obvykle $\pm 5\%$.

4.3. Vlastní spotřeba malé vodní elektrárny

Obecně lze vlastní spotřebu dělit na střídavou a stejnosměrnou. U vodních elektráren je tato spotřeba malá v porovnání s tepelnými a jadernými elektrárnami.

Střídavá vlastní spotřeba je obvykle za provozu napájena z vývodu elektrárny. Pokud má tento vývod generátor nízkého napětí, může být vlastní spotřeba napojena přímo. Jestliže je na vývodu z elektrárny vysoké napětí, musíme napětí transformovat na nižší napěťovou hladinu a až po této transformaci můžeme napojit na vlastní spotřebu. Nejčastěji vlastní spotřebu napájíme napětím označovaným jako 400 V/230 V, 50 Hz.

Pokud máme zvýšené požadavky na zajištění vlastní spotřeby, kdy není přípustný výpadek střídavého napětí vlastní spotřeby za provozu, musíme použít záložní napájení. Záložní napájení může být provedeno z jiného rozvodu střídavého napětí.

Stejnosemnná vlastní spotřeba se v malých vodních elektrárnách používá především

pro napájení ovládacích obvodů, dobíjení baterií, pro napájení budících vinutí. Základní parametr tohoto rozvodu je jmenovité napětí baterie. Nejčastěji se používá napětí 24 V, popřípadě 110 V. U malých vodních elektráren se používá pouze jedna baterie bez jakéhokoliv zdvojování a zálohování.

5. Návrh malé vodní elektrárny

Pro návrh MVE je důležité znát hydrologické podmínky dané lokality. Dle zadané tabulky 5.1, která obsahuje průtoky a čisté spády Q a čisté spády H , sestavím odtokovou křivku. Důležité je pro sestavení grafu znát asanační průtok. Po odečtení asanačního průtoku získáme využitelný průtok Q_V , pro který budeme následně navrhovat MVE. Jak je patrné z tabulky 5.1 čistý spád není konstantní, ale je ovlivňován vzdouváním spodní hladiny.

Tab. 5.1 Odtoková křivka v daném úseku vodního toku

Počet dní	Průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Čistý spád (m)	Asanační průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Využitelný průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Výkon (MW)
0	370	4,5	20	350	16,33
30	250	4,5	20	230	11,04
60	170	5,1	20	150	8,51
90	130	5,5	20	110	7,01
120	110	5,7	20	90	6,15
150	95	5,8	20	75	5,41
180	80	5,9	20	60	4,63
210	68	5,9	20	48	3,94
240	52	5,9	20	32	3,01
270	43	5,9	20	23	2,49
300	34	5,9	20	14	1,97
330	30	5,9	20	10	1,74
365	15	5,9	20	-5	0,87

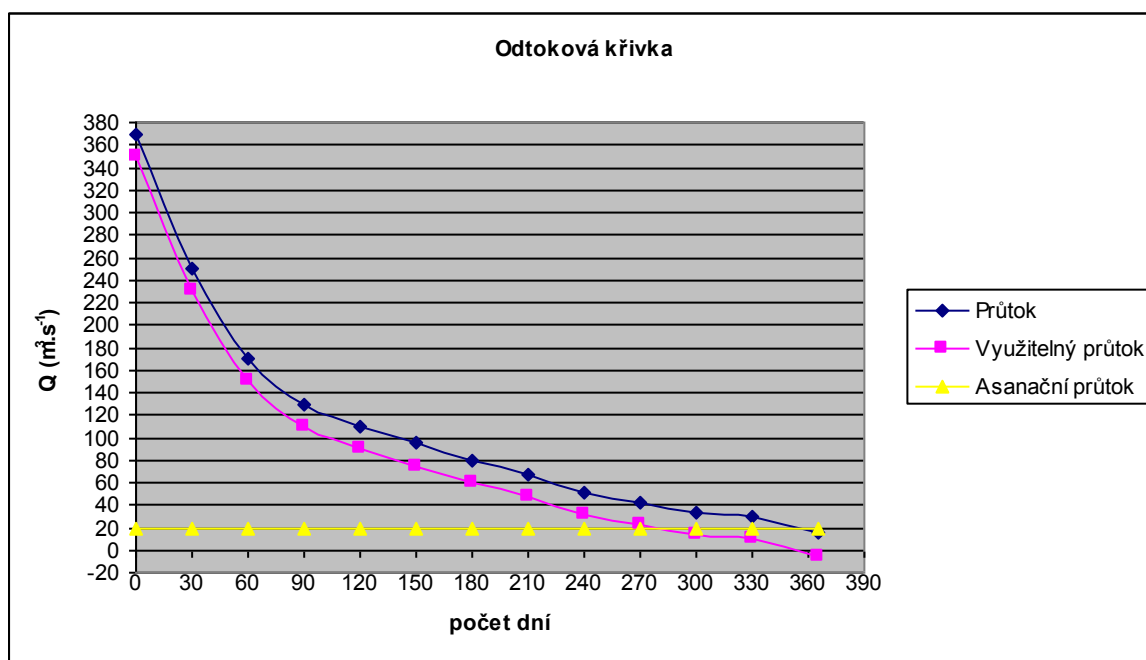
Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Využitelný průtok:

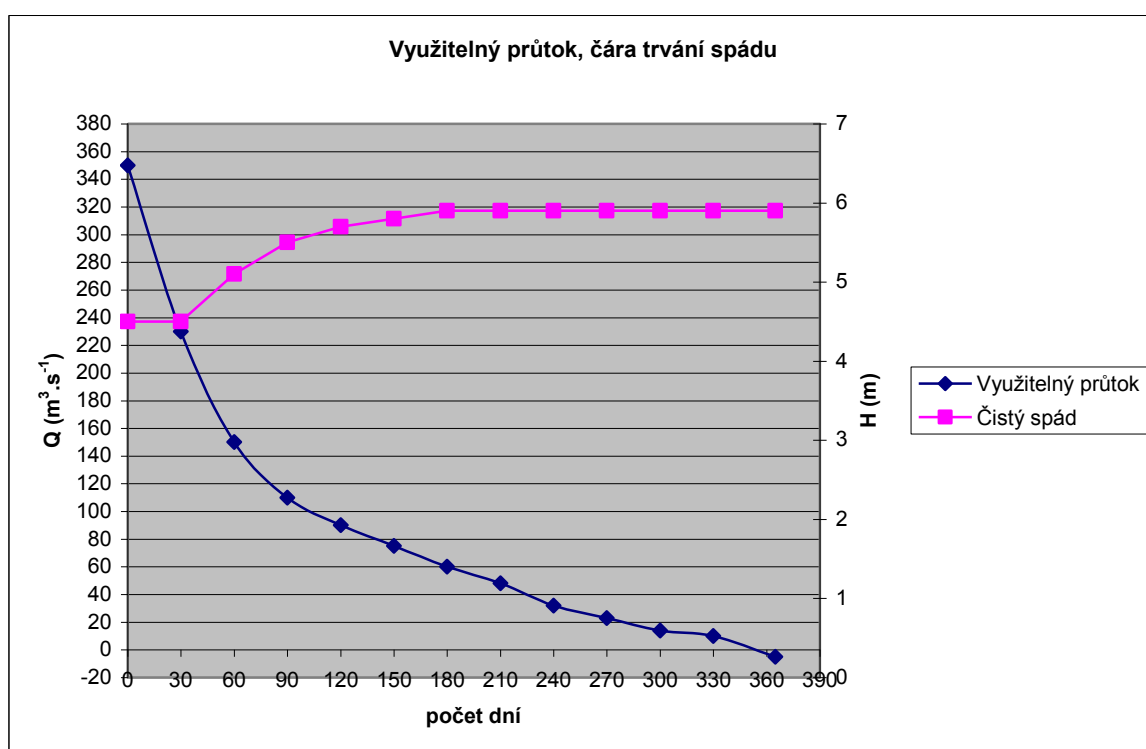
$$Q_V = Q - Q_{asan} = 250 - 20 = 230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Teoretický výkon (2.7):

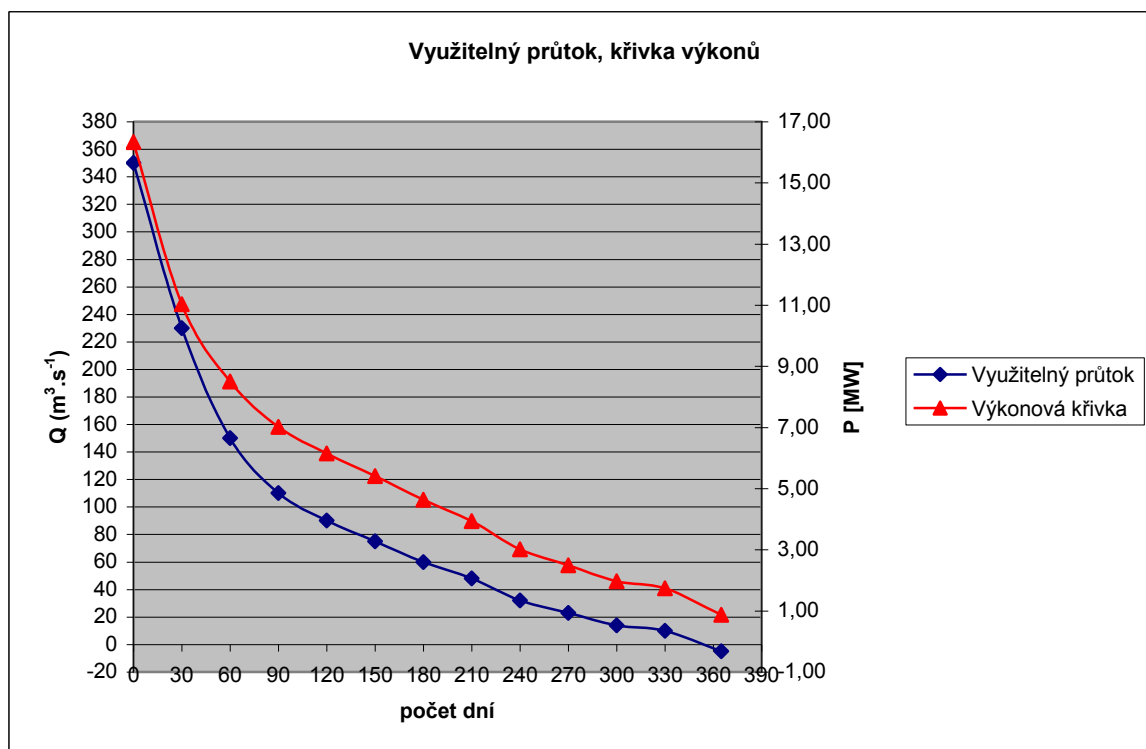
$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 1000 \cdot 9,81 \cdot 250 \cdot 4,5 = 11036250 \text{ W} = 10,04 \text{ MW}$$



Obr. 5.1 Odtoková křivka



Obr. 5.2 Využitelný průtok, čára trvání spádu



Obr. 5.3 Využitelný průtok, křivka výkonů

5.1. Výpočet teoretického výkonu, teoretické energie vodního toku

Tab. 5.2 Výpočet teoretického výkonu, teoretické energie

Interval	Doba trvání T	$Q_{stř}$	$H_{stř}$	Q_V	$P_{T,V}$	$A_{T,V}$
	(h)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	(m)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	(MW)	(MWh)
0 - 30	720	310	4,5	290	12,80	9217,48
30 - 60	720	210	4,8	190	8,95	6441,64
60 - 90	720	150	5,3	130	6,76	4866,54
90 - 120	720	120	5,6	100	5,49	3955,39
120 - 150	720	102,5	5,75	82,5	4,65	3350,61
150 - 180	720	87,5	5,85	67,5	3,87	2789,08
180 - 210	720	74	5,9	54	3,13	2250,34
210 - 240	720	60	5,9	40	2,32	1666,92
240 - 270	720	47,5	5,9	27,5	1,59	1146,00
270 - 300	720	38,5	5,9	18,5	1,07	770,95
300 - 330	720	32	5,9	12	0,69	500,07
330 - 365	840	22,5	5,9	2,5	0,14	121,55
Suma energie za rok:						37076,56

Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Střední průtok:

$$Q_{stř} = \frac{Q_0 + Q_{30}}{2} = \frac{370 + 250}{2} = 310 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spád:

$$H_{stř} = \frac{H_0 + H_{30}}{2} = \frac{4,5 + 4,5}{2} = 4,5 \text{ m}$$

Využitelný průtok:

$$Q_V = Q_{stř} - Q_{asan} = 310 - 20 = 290 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výkon teoreticky využitelný:

$$P_{T,V} = \rho \cdot g \cdot Q_V \cdot H_{stř} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 290 \cdot 4,5 = 12802050 \text{ W} = 12,8 \text{ MW}$$

Časový interval:

$$T = dny \cdot 24 = 30 \cdot 24 = 720 \text{ h}$$

Teoreticky využitelná energie:

$$A_{T,V} = P_{T,V} \cdot T = 12,80205 \cdot 720 = 9217,48 \text{ MWh}$$

Volbu turbíny jsem provedl na základě zadané odtokové křivky, která je v tabulce 5.1. Z tabulky je patrné, že spády jsou přibližně 5 metrů. Z Q/H diagramu, který je na obrázku 3.1, vyplývá, že nejlepší typ turbíny pro zadanou odtokovou křivku je Kaplanova turbína.

5.2. Varianta MVE s jednou turbínou

5.2.1. Turbína

Kaplanova turbína:

Typ: GZ735B-WS-420

Výrobce: Zhejiang Jinlun Electromechanic Co., Ltd, Čína

$H = 4,8 \text{ m}$

$$Q = 100,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$n = 111 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Účinnostní charakteristiku pro zvolený typ turbíny výrobce nedal k dispozici, proto jsem použil univerzální charakteristiku Kaplanovy turbíny viz. obrázek 5.4, kterou mi poskytl vedoucí bakalářské práce.

Maximální průtok turbínou (hltnost):

$$Q_{\max} = 1,1 \cdot Q = 1,1 \cdot 100,17 \doteq 110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Minimální průtok turbínou:

- Volím 25 % jmenovitého průtoku Q

$$Q_{\min} = 0,25 \cdot Q = 0,25 \cdot 100,17 \doteq 25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

5.2.2. Výpočet instalovaného výkonu pro variantu s jednou turbínou

Maximální průtok turbínou:

$$Q = 110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,887 \cdot 0,98 \cdot 0,957 \cdot 0,98 = 0,815$$

Maximální výkon na prahu malé vodní elektrárny:

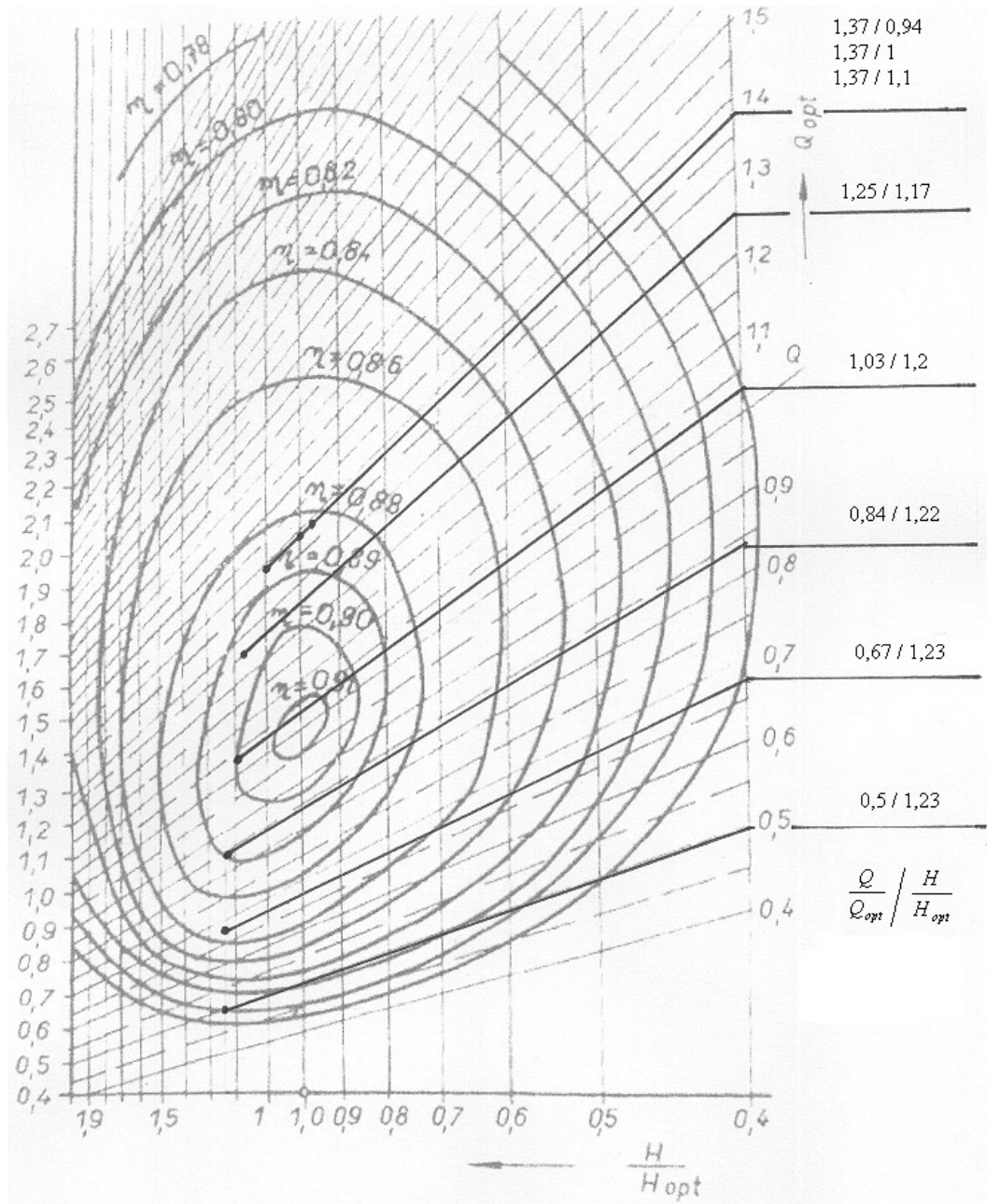
$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stř} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 110,19 \cdot 5,3 \cdot 0,815 = 4661,17 \text{ kW} = 4,66 \text{ MW}$$

Instalovaný výkon malé vodní elektrárny:

$$P_i = 0,95 \cdot P = 0,95 \cdot 4,66 = 4,43 \text{ MW}$$

Instalovaný výkon P_i se z ekonomických důvodů doporučuje volit o 5 % menší než je maximální výkon vodní elektrárny z důvodů lepšího využití instalovaného výkonu.

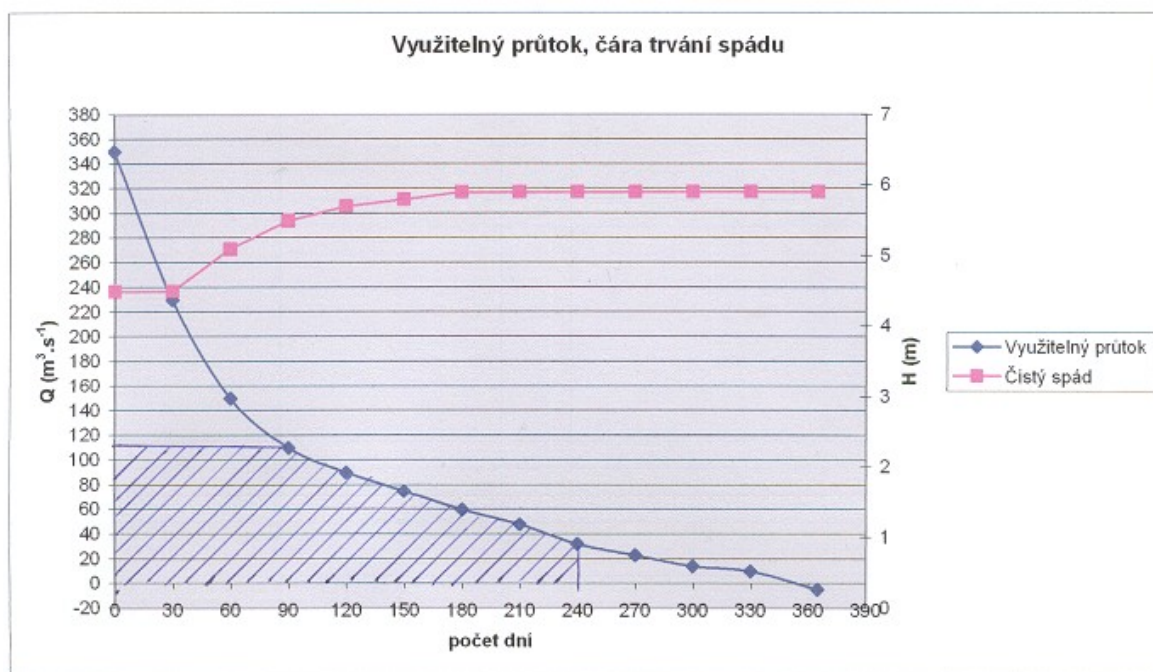
5.2.3. Výpočet množství vyrobené elektrické energie



Obr. 5.4 Univerzální charakteristika turbíny s vyznačenými body stanovení účinnosti pro variantu s jednou turbínou

Tab. 5.3 Mechanická účinnost

Interval	$H_{stř}$	Q_V	$H_{stř}/H_{opt}$	Q_V/Q_{opt}	η_t
	(m)	($m^3 \cdot s^{-1}$)	(-)	(-)	(-)
0 - 30	4,5	110	0,94	1,37	0,882
30 - 60	4,8	110	1,00	1,37	0,884
60 - 90	5,3	110	1,10	1,37	0,887
90 - 120	5,6	100	1,17	1,25	0,895
120 - 150	5,75	82,5	1,20	1,03	0,900
150 - 180	5,85	67,5	1,22	0,84	0,890
180 - 210	5,9	54	1,23	0,67	0,867
210 - 240	5,9	40	1,23	0,50	0,790
240 - 270	5,9	27,5	1,23	0,34	0
270 - 300	5,9	18,5	1,23	0,23	0
300 - 330	5,9	12	1,23	0,15	0
330 - 365	5,9	2,5	1,23	0,03	0



Obr. 5.5 Využitelný průtok, čára trvání spádu, využitá energie Kaplanovou turbínou

Tab. 5.4 Výpočet množství elektrické energie pro variantu s jednou turbínou

Interval	Doba provozu T	Q_v	$H_{stř}$	η_t
	(h)	($m^3 \cdot s^{-1}$)	(m)	(-)
0 - 30	648	110	4,5	0,882
30 - 60	720	110	4,8	0,884
60 - 90	720	110	5,3	0,887
90 - 120	720	100	5,6	0,895
120 - 150	720	82,5	5,75	0,900
150 - 180	720	67,5	5,85	0,890
180 - 210	720	54	5,9	0,867
210 - 240	720	40	5,9	0,790
240 - 270	0	27,5	5,9	0
270 - 300	0	18,5	5,9	0
300 - 330	0	12	5,9	0
330 - 365	0	2,5	5,9	0

η_p	η_g	η_{tr}	P	A
(-)	(-)	(-)	(MW)	(MWh)
0,98	0,957	0,98	3,94	2550,83
0,98	0,957	0,98	4,21	3030,06
0,98	0,957	0,98	4,66	3357,05
0,98	0,957	0,98	4,52	3253,69
0,98	0,957	0,98	3,85	2771,60
0,98	0,957	0,98	3,17	2281,47
0,98	0,957	0,98	2,49	1793,21
0,98	0,957	0,98	1,68	1210,33
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
Suma energie za rok:				20248,25

V intervalu 0 – 30 dní je doba využití elektrárny pouze 648 hodin místo 720 hodin z důvodu předpokládané odstávky pro povodňové stavy. Mechanické účinnosti pro turbínu jsou odečteny z univerzální charakteristiky turbíny viz. obr. 5.4. Od 240 dne bude již elektrárna odstavena, protože průtok vody ve vodním toku je pod minimálním průtokem turbíny.

Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Střední průtok:

$$Q_{stř} = \frac{Q_{60} + Q_{90}}{2} = \frac{170 + 130}{2} = 150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spád:

$$H_{stř} = \frac{H_{60} + H_{90}}{2} = \frac{5,1 + 5,5}{2} = 5,3 \text{ m}$$

Využitelný průtok:

$$Q_V = Q_{stř} - Q_{asan} = 150 - 20 = 130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Využitelný průtok $Q_V = 130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nevyužijeme celý, protože hltnost zvolené turbíny je nižší. Využitý průtok turbínou je $110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Výkon na hřídeli turbíny:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t = 9,81 \cdot 110 \cdot 5,3 \cdot 0,887 = 5072,96 \text{ kW} = 5,07 \text{ MW}$$

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,887 \cdot 0,98 \cdot 0,957 \cdot 0,98 = 0,815$$

Výkon na prahu malé vodní elektrárny:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stř} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 110 \cdot 5,3 \cdot 0,815 = 4661,17 \text{ kW} = 4,66 \text{ MW}$$

Časový interval:

$$T = dny \cdot 24 = 30 \cdot 24 = 720 \text{ h}$$

Vyrobená elektrická energie:

$$A = P \cdot T = 4,66 \cdot 720 = 3357,05 \text{ MWh}$$

Množství elektrické energie vyrobené za rok:

$$\sum A = 20248,25 \text{ MWh}$$

Doba ročního využití instalovaného výkonu:

$$T = \frac{A}{P_i} = \frac{20248,25}{4,43} \doteq 4570 \text{ hod}$$

U průběžných vodních elektráren vychází tato doba T obvykle asi 4500 až 5550 hodin. [4]

Koeficient ročního využití malé vodní elektrárny:

$$k_v = \frac{T}{8760} = \frac{4570}{8760} = 0,52$$

5.2.4. Generátor

Typ: Synchronní generátor, 16 pólů, SF4000-16/2600

Výrobce: Zhejiang Linhai Electrical Machinery Co., Ltd, Čína

$$S_N = 5000 \text{ kVA}$$

$$P_N = 4000 \text{ kW}$$

$$U_N = 6300 \text{ V}$$

$$I_N = 458,2 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\eta_g = 95,7 \%$$

$$n = 375 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

5.2.5. Transformátor

Vyvedení elektrické energie z vodní elektrárny bude provedeno přímo na distribuční síť 22 kV. Vzhledem tomu, že zvolený synchronní generátor má napětí 6 300 V, je nejvhodnější použít transformátor s převodovým poměrem 6,3/22 kV. Použijeme paralelní spojení dvou transformátorů, jeden o výkonu 4000 kVA a druhý o výkonu 1600 kVA. Při paralelní spolupráci transformátorů musí mít stejný převod, hodinový úhel, napětí nakrátko, sled fází. Výkony volíme tak, aby poměr mezi nimi nebyl větší než 1:3 z důvodu rozdělení zatížení transformátorů.

5.3. Varianta MVE se dvěma turbínami

5.3.1. Turbína

Pro variantu malé vodní elektrárny se dvěma turbínami jsem zvolil jednu turbínu většího výkonu a druhou turbínu s menším výkonem z důvodu efektivnějšího využití vodního toku.

1. turbína:

Typ: GZ735B-WS-420

Výrobce: Zhejiang Jinlun Electromechanic Co., Ltd, Čína

$$H = 4,8 \text{ m}$$

$$Q = 100,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$n = 111 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Maximální průtok turbínou (hltnost):

$$Q_{\max} = 1,1 \cdot Q = 1,1 \cdot 100,17 \doteq 110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Minimální průtok turbínou:

- Volím 25 % jmenovitého průtoku Q

$$Q_{\min} = 0,25 \cdot Q = 0,25 \cdot 100,17 \doteq 25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

2. turbína:

Typ: GSJ735B-WS-260

Výrobce: Zhejiang Jinlun Electromechanic Co., Ltd, Čína

$$H = 5 \text{ m}$$

$$Q = 39,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$n = 187,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Maximální průtok turbínou (hltnost):

$$Q_{\max} = 1,1 \cdot Q = 1,1 \cdot 39,13 \doteq 43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Minimální průtok turbínou:

- Volím 25 % jmenovitého průtoku Q

$$Q_{\min} = 0,25 \cdot Q = 0,25 \cdot 39,13 \doteq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

5.3.2. Výpočet instalovaného výkonu pro variantu se dvěma turbínami

Maximální průtok 1. turbínou:

$$Q_1 = 110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Maximální průtok 2. turbínou:

$$Q_2 = 40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Celková účinnost pro blok s 1. turbínou:

$$\eta_{c1} = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,884 \cdot 0,98 \cdot 0,957 \cdot 0,98 = 0,812$$

Celková účinnost pro blok s 2. turbínou:

$$\eta_{c2} = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,89 \cdot 0,98 \cdot 0,957 \cdot 0,98 = 0,818$$

Maximální výkon na prahu malé vodní elektrárny pro blok s 1. turbínou:

$$P_1 = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stř} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 110 \cdot 4,8 \cdot 0,812 = 4205,9 \text{ kW} = 4,21 \text{ MW}$$

Maximální výkon na prahu malé vodní elektrárny pro blok s 2. turbínou:

$$P_2 = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stř} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 40 \cdot 4,8 \cdot 0,818 = 1540,72 \text{ kW} = 1,54 \text{ MW}$$

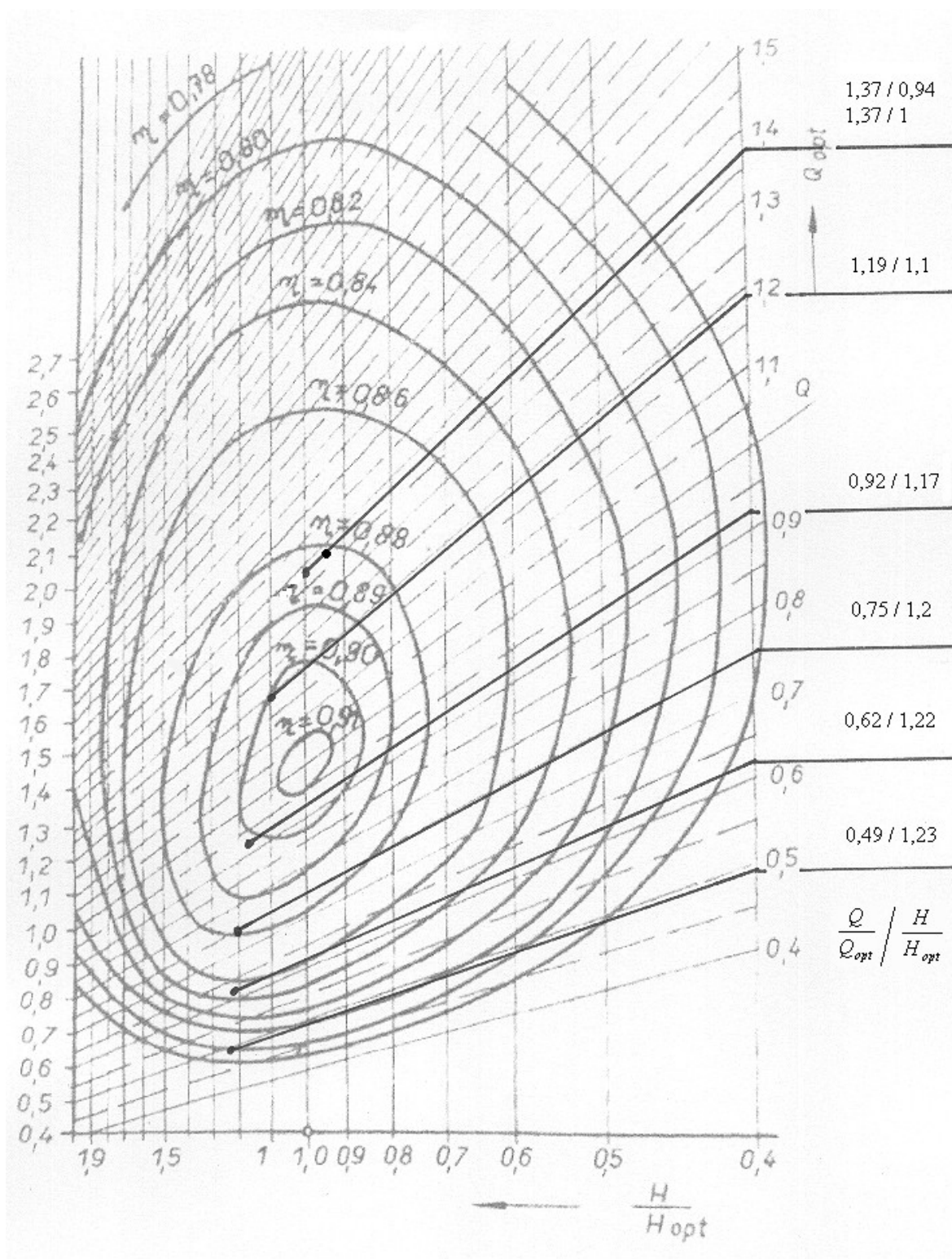
Maximální výkon na prahu malé vodní elektrárny:

$$P = P_1 + P_2 = 4,21 + 1,54 = 5,75 \text{ MW}$$

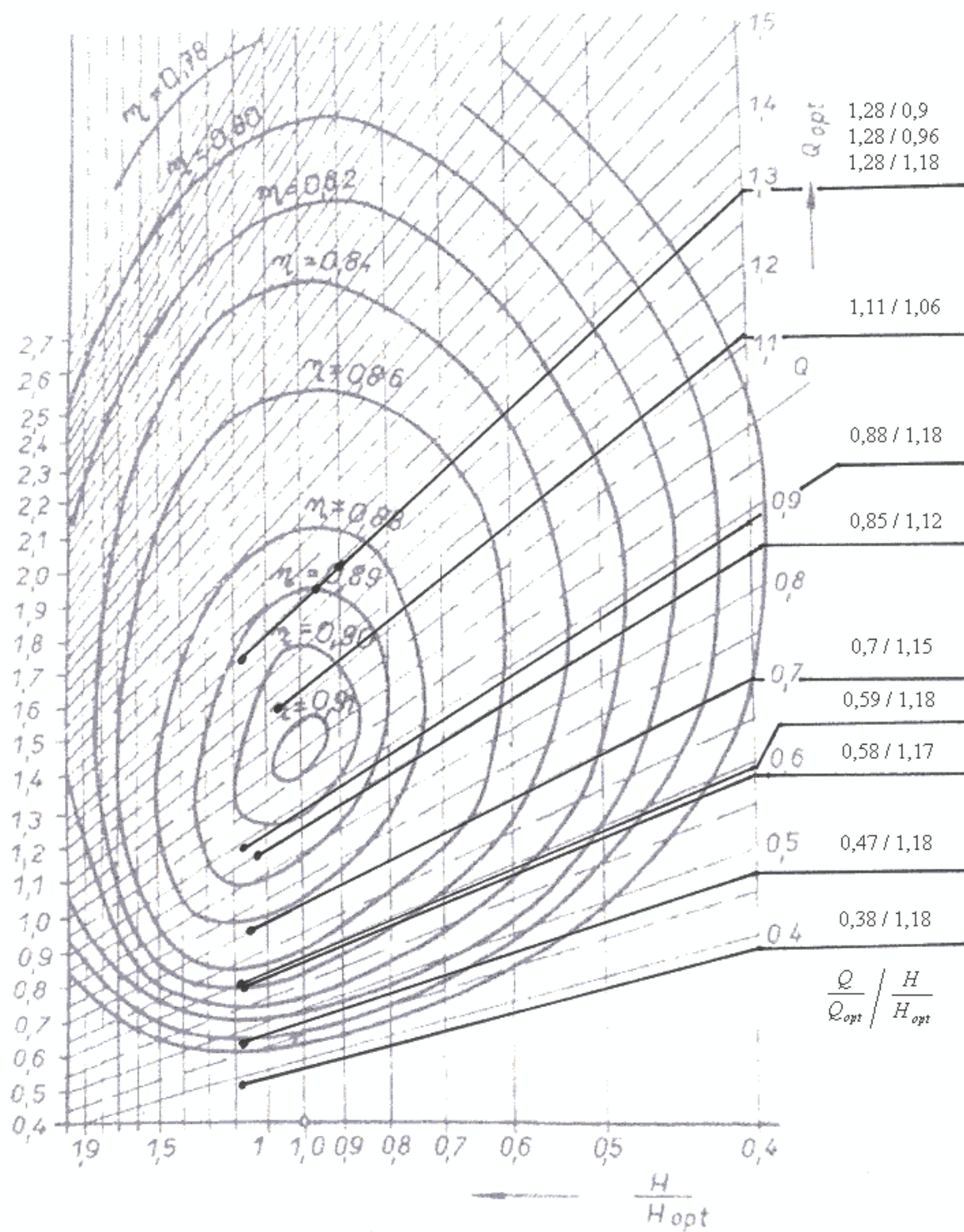
Instalovaný výkon malé vodní elektrárny:

$$P_i = 0,95 \cdot P = 0,95 \cdot 5,75 = 5,46 \text{ MW}$$

5.3.3. Výpočet množství vyrobené elektrické energie



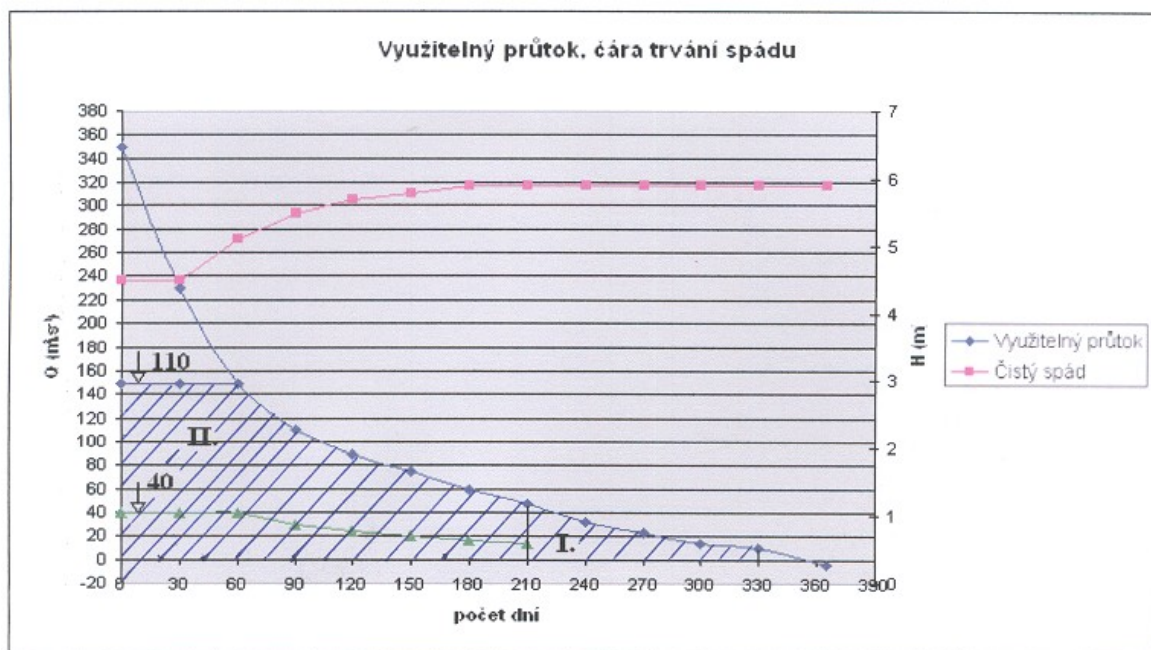
Obr. 5.6 Univerzální charakteristika turbíny s vyznačenými body stanovení účinnosti pro variantu se dvěma turbínami (1. turbína)



Obr. 5.7 Univerzální charakteristika turbíny s vyznačenými body stanovení účinnosti pro variantu se dvěma turbínami (2. turbína)

Tab. 5.5 Mechanická účinnost

č. turbíny	Interval	$H_{stř}$ (m)	Q_V ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$H_{stř}/H_{opt}$ (m)	Q_V/Q_{opt} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	η_t (-)
1.	0 - 30	4,5	110	0,94	1,37	0,881
2.		4,5	40	0,90	1,28	0,885
1.	30 - 60	4,8	110	1,00	1,37	0,884
2.		4,8	40	0,96	1,28	0,89
1.	60 - 90	5,3	95,35	1,10	1,19	0,9
2.		5,3	34,65	1,06	1,11	0,905
1.	90 - 120	5,6	73,35	1,17	0,92	0,888
2.		5,6	26,65	1,12	0,85	0,884
1.	120 - 150	5,75	60,5	1,20	0,75	0,88
2.		5,75	22	1,15	0,70	0,865
1.	150 - 180	5,85	49,5	1,22	0,62	0,85
2.		5,85	18	1,17	0,58	0,84
1.	180 - 210	5,9	39,3	1,23	0,49	0,79
2.		5,9	14,7	1,18	0,47	0,79
2.	210 - 240	5,9	40	1,18	1,28	0,892
2.	240 - 270	5,9	27,5	1,18	0,88	0,895
2.	270 - 300	5,9	18,5	1,18	0,59	0,84
2.	300 - 330	5,9	12	1,18	0,38	0,74
2.	330 - 365	5,9	2,5	1,18	0,08	0



Obr. 5.8 Využitelný průtok, čára trvání spádu, využitá energie Kaplanovými turbínami

Tab. 5.6 Výpočet množství elektrické energie pro variantu se dvěma turbínami

č. turbíny	Interval	Doba provozu T	Q_v	$H_{stř}$	η_t
		(h)	($m^3 \cdot s^{-1}$)	(m)	(-)
1.	0 - 30	648	110	4,5	0,881
2.		648	40	4,5	0,885
1.	30 - 60	720	110	4,8	0,884
2.		720	40	4,8	0,89
1.	60 - 90	720	95,35	5,3	0,9
2.		720	34,65	5,3	0,905
1.	90 - 120	720	73,35	5,6	0,888
2.		720	26,65	5,6	0,884
1.	120 - 150	720	60,5	5,75	0,88
2.		720	22	5,75	0,865
1.	150 - 180	720	49,5	5,85	0,85
2.		720	18	5,85	0,84
1.	180 - 210	720	39,3	5,9	0,79
2.		720	14,7	5,9	0,79
2.	210 - 240	720	40	5,9	0,892
2.	240 - 270	720	27,5	5,9	0,895
2.	270 - 300	720	18,5	5,9	0,84
2.	300 - 330	720	12	5,9	0,74
2.	330 - 365	720	2,5	5,9	0

η_p	η_g	η_{tr}	P	A
(-)	(-)	(-)	(MW)	(MWh)
0,98	0,957	0,98	3,93	2547,94
0,98	0,957	0,98	1,44	930,73
0,98	0,957	0,98	4,21	3030,06
0,98	0,957	0,98	1,54	1109,32
0,98	0,957	0,98	4,10	2952,60
0,98	0,957	0,98	1,50	1078,93
0,98	0,957	0,98	3,29	2367,92
0,98	0,957	0,98	1,19	856,45
0,98	0,957	0,98	2,76	1987,34
0,98	0,957	0,98	0,99	710,35
0,98	0,957	0,98	2,22	1597,89
0,98	0,957	0,98	0,80	574,21
0,98	0,957	0,98	1,65	1189,15
0,98	0,957	0,98	0,62	444,80
0,98	0,957	0,98	1,90	1366,60
0,98	0,957	0,98	1,31	942,70
0,98	0,957	0,98	0,83	595,21
0,98	0,957	0,98	0,47	340,12
0	0	0	0	0
			suma energie	24622,32

Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Postup výpočtu pro vyznačený řádek v tabulce je stejný jako u varianty s jednou turbínou, viz. kapitola 5.2.3.

Doba ročního využití instalovaného výkonu:

$$T = \frac{A}{P_i} = \frac{24622,32}{5,46} \doteq 4509 \text{ hod}$$

U průběžných vodních elektráren vychází tato doba T obvykle asi 4500 až 5550 hodin. [4]

Koeficient ročního využití malé vodní elektrárny:

$$k_v = \frac{T}{8760} = \frac{4509}{8760} = 0,51$$

5.3.4. Generátor**Generátor pro 1. turbínu:**

Typ: Synchronní generátor, 16 pólů, SF4000-16/2600

Výrobce: Zhejiang Linhai Electrical Machinery Co., Ltd, Čína

$$S_N = 5000 \text{ kVA}$$

$$P_N = 4000 \text{ kW}$$

$$U_N = 6300 \text{ V}$$

$$I_N = 458,2 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\eta_g = 95,7 \%$$

$$n = 375 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Generátor pro 2. turbínu:

Typ: Synchronní generátor, 12 pólů, SFW1600-12/1730

Výrobce: Zhejiang Linhai Electrical Machinery Co., Ltd, Čína

$$S_N = 2000 \text{ kVA}$$

$$P_N = 1600 \text{ kW}$$

$$U_N = 6300 \text{ V}$$

$$I_N = 183,3 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\eta_g = 95,7 \%$$

$$n = 500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

5.3.5. Transformátor

Vyvedení elektrické energie z vodní elektrárny bude provedeno přímo na distribuční síť 22 kV. Vzhledem tomu, že zvolený synchronní generátor má napětí 6 300 V, je nejvhodnější použít transformátor s převodovým poměrem 6,3/22 kV. Použijeme paralelní spojení dvou transformátorů, každý o výkonu 4000 kVA. Při paralelní spolupráci transformátorů musí mít stejný převod, hodinový úhel, napětí nakrátko, sled fází. Výkony volíme tak, aby poměr mezi nimi nebyl větší než 1:3 z důvodu rozdělení zatížení transformátorů.

6. Návratnost investic

6.1. Investiční náklady na výstavbu MVE

Pro stanovení investičních nákladů MVE vycházím z vyhlášky č.475/2005 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů ve znění pozdějších předpisů.

Doba životnosti se předpokládá 30 let. Měrné investiční náklady a roční využití instalovaného výkonu zdroje jsou uvedeny v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Měrné investiční náklady a roční využití instalovaného výkonu zdroje [3]

Celkové měrné investiční náklady (Kč · kW _e ⁻¹)	Roční využití instalovaného výkonu (kWh · kW _e ⁻¹)
130 000	> 4 000
140 000	> 4 300
150 000	> 4 600

6.1.1. Investiční náklady pro variantu s jednou turbínou

Roční využití instalovaného výkonu:

$$V_{\text{využití}} P_i = \frac{A_s}{P_i} = \frac{20248,25 \cdot 10^3}{4,43 \cdot 10^3} = 4570,71 \text{ kWh} \cdot \text{kW}_e^{-1}$$

Měrné investiční náklady pro variantu s jednou turbínou jsou $140\,000 \text{ Kč} \cdot \text{kW}_e$, protože roční využití instalovaného výkonu je $4570,71 \text{ kWh} \cdot \text{kW}_e^{-1}$.

Celkové investiční náklady:

$$N = N_{\text{inv.}} \cdot P_i = 140 \cdot 10^3 \cdot 4,43 \cdot 10^3 = 620,2 \text{ mil. Kč}$$

6.1.2. Investiční náklady pro variantu se dvěma turbínami

Roční využití instalovaného výkonu:

$$V_{\text{využití}} P_i = \frac{A_s}{P_i} = \frac{24622,32 \cdot 10^3}{5,46 \cdot 10^3} = 4509,58 \text{ kWh} \cdot \text{kW}_e^{-1}$$

Měrné investiční náklady pro variantu s jednou turbínou jsou $140\,000 \text{ Kč} \cdot \text{kW}_e$, protože roční využití instalovaného výkonu je $4509,58 \text{ kWh} \cdot \text{kW}_e^{-1}$.

Celkové investiční náklady:

$$N = N_{\text{inv.}} \cdot P_i = 140 \cdot 10^3 \cdot 5,46 \cdot 10^3 = 764,4 \text{ mil. Kč}$$

6.2. Doba návratnosti investic

Dobu návratnosti lze definovat jako počet let, za který se kapitálový výdaj splatí peněžními příjmy z investice. [8] Investice je výhodnější, když je doba splatnosti kratší. U této metody neuvažujeme výnosy po době splácení a z toho vyplývá, že upřednostňujeme varianty s kratší životností, i když ne vždy jsou efektivní. Pomocí doby úhrady se mohou porovnávat jen investiční varianty se stejnou dobou životnosti.[8]

Metodu dobu návratnosti nemůžeme považovat za všeobecné kritérium pro posuzování investic. Poskytuje nám důležitou informaci o riziku investice a o likviditě investice (ukazuje, jak dlouho bude kapitál vázán v investici).

Dobu návratnosti určíme jako poměr investičních nákladů k zisku za prodanou

elektrickou energii. Výkupní cena elektrické energie je $3\,000 \text{ Kč} \cdot \text{MWh}^{-1}$ podle cenového rozhodnutí ERÚ č. 2/2010 ze dne 8. listopadu 2010, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů. [13] Tato výkupní cena elektrické energie platí pro MVE uvedené do provozu od 1.1.2011 do 31.12.2011.

6.2.1. Doba návratnosti pro variantu s jednou turbínou

Roční zisk:

$$Z_r = \text{výkupní cena} \cdot A_s = 3000 \cdot 20248,25 = 60,74 \text{ mil. Kč}$$

Doba návratnosti:

$$T = \frac{N}{Z_r} = \frac{620,2}{60,74} = 10,21 \text{ roků}$$

6.2.2. Doba návratnosti pro variantu se dvěma turbínami

Roční zisk:

$$Z_r = \text{výkupní cena} \cdot A_s = 3000 \cdot 24622,32 = 73,87 \text{ mil. Kč}$$

Doba návratnosti:

$$T = \frac{N}{Z_r} = \frac{764,4}{73,87} = 10,35 \text{ roků}$$

6.3. Dotace

V současné době je v České republice velký rozvoj projektů, které se zaměřují na výrobu energie z obnovitelných zdrojů energie, protože jsou poskytovány dotace na realizaci a provoz. Tyto dotace jsou poskytovány z operačních programů Evropské unie nebo České republiky. Projekty, které vyrábí elektrickou energii z obnovitelných zdrojů, mají garantovanou vyšší výkupní cenu elektrické energie po stanovenou dobu.

6.3.1. Program OPPI

Operační program je spolufinancován z Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF) z 85 % a ze státního rozpočtu z 15 %. Správcem programu (poskytovatelem dotace) je Ministerstvo průmyslu a obchodu a zprostředkující subjekt je CZECHINVEST.

[18] Tento program je vyhlášen pro období 2007 – 2013. V rámci programu EKO – ENERGIE, který je součástí programu OPPI, je podporováno využití obnovitelných a druhotných zdrojů energie kromě fotovoltaických, geotermálních a větrných elektráren a zvyšování účinnosti při výrobě a spotřebě energie.

V rámci III.výzvy programu EKO – ENERGIE je maximální výše dotace na MVE 40 % z celkových investičních nákladů. Žádosti je možno podávat do 30.6.2013.

6.3.2. Program EFEKT

Z programu EFEKT lze žádat podporu na obnovitelné zdroje energie. Tento program je podporován ze strukturovaných fondů Evropské unie. Je součástí Státního programu na podporu úspor energie a využití OZE (část A). Rozpočet programu pro rok 2011 je 30 mil. Kč. [16]

V rámci programu EFEKT lze na výstavbu MVE získat maximální výši podpory 3 milióny korun, avšak maximálně 40 % z celkových investičních nákladů.

7. Závěr

V bakalářské práci je proveden teoretický rozbor vodohospodářského a hydroenergetického řešení malé vodní elektrárny, který zahrnuje hydroenergetický potenciál vodního toku, základní parametry hydroenergetického díla, dělení vodních elektráren podle spádu a způsobu provozu a řešení průběžné vodní elektrárny. Dále je v teoretické části proveden rozbor strojní části malé vodní elektrárny, ve kterém jsou popsány turbíny, savky přetlakových turbín, převody a uzávěry. Následně je proveden rozbor elektrické části malé vodní elektrárny, který obsahuje popis generátorů, transformátorů a vlastní spotřeby malé vodní elektrárny.

Ve výpočtové části bakalářské práce jsem vycházel z odtokové křivky vodního toku pro danou lokalitu, která je uvedena v tab. 5.1 a byla poskytnuta vedoucím bakalářské práce. Z tabulky odtokové křivky jsem vykreslil grafy odtokové křivky, využitelný průtok, čáru trvání spádu a křivku výkonu. V tab. 5.2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty teoretického výkonu a teoretické energie a suma celkové vyrobené elektrické energie $\sum A_{T,C} = 37076,56 \text{ MWh}$. Maximální teoretický využitelný výkon turbíny je $P_{T,V} = 12,8 \text{ MW}$.

V bakalářské práci jsou zpracovány varianty malé vodní elektrárny s jednou a dvěma turbínami. V obou případech jsou použity Kaplanovy turbíny. Ve variantě s jednou turbínou je použita Kaplanova turbína typu GZ735B-WS-420. Malá vodní elektrárna má instalovaný výkon $P_i = 4,43 \text{ MW}$ a roční vyrobená elektrická energie je $\sum A = 20248,25 \text{ MWh}$. Druhá varianta je navržena se dvěma Kaplanovými turbínami typu GZ735B-WS-420 a GSJ735B-WS-260 o výkonech $P_1 = 4,21 \text{ MW}$ a $P_2 = 1,54 \text{ MW}$. Instalovaný výkon této elektrárny je roven součtu výkonů jednotlivých turbín, který činí $P_i = 5,46 \text{ MW}$ a tato hodnota je snížena o 5 %. Roční vyrobená elektrická energie je $\sum A = 24622,32 \text{ MWh}$.

Investiční náklady na jednotlivé varianty malé vodní elektrárny byly určeny pomocí měrných investičních nákladů a ročního využití instalovaného výkonu zdroje, viz. tab. 6.1. Pro variantu s jednou turbínou vychází celkové investiční náklady $N = 620,2 \text{ mil. Kč}$, roční zisk $Z_r = 60,74 \text{ mil. Kč}$ a doba návratnosti je $T = 10,21 \text{ roků}$. U varianty se dvěma turbínami jsou celkové investiční náklady $N = 764,4 \text{ mil. Kč}$, roční zisk $Z_r = 73,87 \text{ mil. Kč}$ a doba návratnosti je $T = 10,35 \text{ roků}$. Roční zisk za vyrobenou

elektrickou energii je vypočítán z ceny, kterou určil Energetický regulační úřad. Doby návratnosti jsou pouze orientační, protože není brána v úvahu zvyšující se cena elektrické energie a také celkové investiční náklady jsou určeny pouze orientačně.

Stanovená doba návratnosti u obou navržených variant řešení je asi 10 roků a lze ji hodnotit jako dobrou. Pro stavbu malé vodní elektrárny je lepší varianta se dvěma turbínami, protože při malých průtocích lze jednu turbínu odstavit a elektrárna bude pracovat pouze s jednou turbínou, která bude mít lepší účinnost. Také v případě poruchy jedné turbíny může elektrárna pracovat se sníženým výkonem a nemusíme ji odstavovat celou. Ačkoli má varianta s jednou turbínou o setinu vyšší koeficient využití, budeme považovat variantu se dvěma turbínami za lepší. Protože uvažujeme-li životnost malé vodní elektrárny 30 let, bude množství vyrobené energie vyšší a tudíž i zisky za vyrobenou elektrickou energii budou vyšší než u varianty s jednou turbínou. Varianta se dvěma turbínami vyrobí za rok o 4374 MWh více než varianta s jednou turbínou a zisky za rok jsou vyšší o 13,1 miliónů korun, pokud neuvažují se vzrůstající cenou elektrické energie.

Použitá literatura

- [1] BEDNÁŘ, Josef. Malé vodní elektrárny 2 : Turbíny. Vydání první. Praha : SNTL, 1989. 240 s. DT 621.311.21-181.4.
- [2] BRAUNER, Jiří; ŠINDLER, Zdeněk. Elektrická část elektráren. I. vydání. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1987. 243 s.
- [3] Česká republika. Vyhláška č. 475/2005 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů. Sbírka zákonů, Česká republika. 2005, částka 166, s. 8847-8853. ISSN 1211-1244.
- [4] GABRIEL, Pavel; ČIHÁK, František; KALANDA, Petr. Malé vodní elektrárny. Vydání první. Praha : ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [5] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002. 136 s. ISBN 80-248-0025-X.
- [6] CHMELÍK, Karel. Stejnosměrné a komutátorové elektrické stroje, obecný stroj. 1. vydání. Ostrava : VŠB - technická univerzita Ostrava, 2001. 130 s. ISBN 80-7078-857-7.
- [7] JÍLEK, Radim. Trojfázové asynchronní motory pracující trvale v protiproudé brzdě. Ostrava, 2010. 38 s. Bakalářská práce. VŠB - TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Dostupné z WWW: <<http://hdl.handle.net/10084/78711>>. Signatura: 201001823.
- [8] MEDVEC, Zdeněk. *Materiály k předmětu Ekonomika a management v elektroenergetice*. Fakulta elektrotechniky a informatiky, katedra elektroenergetiky. VŠB – TU Ostrava.
- [9] MELICHAR, Jan; VOJTEK, Jan; BLÁHA, Jaroslav. Malé vodní turbíny : Konstrukce a provoz. Vydání první. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998. 299 s. ISBN 80-01-01808-0.
- [10] PAŽOUT, František. Malé vodní elektrárny 1 : Ekonomika - předpisy. Vydání druhé, přepracované. Praha : SNTL, 1990. 504 s. ISBN 80-03-00192-7.
- [11] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. oprav. a dopl. vyd. Praha: Academia, 1982. 728 s. ISBN 509-21-857.
- [12] Ckdblansko.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-23]. Vodní motory. Dostupné z WWW: <<http://www.ckdblansko.cz>>.
- [13] FIŘT, Josef. Tzb-info.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-06]. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 2/2010 ze dne 8. listopadu 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/download.py?file=docu/predpisy/download/CR2-2010.pdf>>.
- [14] I-EKIS.cz [online]. 2008 [cit. 2011-03-15]. Energie vody. Dostupné z WWW: <<http://www.i-ekis.cz/?page=voda>>.
- [15] Lhemc.com [online]. 2005 [cit. 2011-04-06]. Products. Dostupné z WWW: <<http://www.lhemc.com/eproduct.htm>>.
- [16] Mpo-efekt.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-23]. EFEKT 2011. Dostupné z WWW: <<http://www.mpo-efekt.cz/cz/programy-podpory/24918>>.

- [17] Omzhranice.cz [online]. 2011 [cit. 2011-04-06]. Nabídka transformátorů. Dostupné z WWW: <<http://www.omzhranice.cz/repase.php>>.
- [18] Tzb-info.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-23]. Podpora energetické efektivity v České republice v kontextu ostatních zemí EU I. Dostupné z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/energeticka-politika/6648-podpora-energeticke-efektivnosti-v-ceske-republice-v-kontextu-ostatnich-zemi-eu-i>>.
- [19] Vosaspsekrizik.cz [online]. 2010 [cit. 2011-03-15]. VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křižíka. Dostupné z WWW: <<http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/sps/elektroenergetika/male-vodni-elektrarny.pdf>>.
- [20] Zjil.com [online]. 2011 [cit. 2011-04-06]. Products, Kaplan Turbine. Dostupné z WWW: <http://www.zjil.com/comcontent_detail1/&FrontComContent_list01-1269843720387ContId=1090e436-56f6-4a62-bcd1-d47b10d89c06&comContentId=1090e436-56f6-4a62-bcd1-d47b10d89c06&comp_stats=comp-FrontComContent_list01-1269843720387.html>.